

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

**Caratterizzazione di SiPM
in ambiente criogenico
per il Far Detector di DUNE**

Relatore:

Dott. Gabriele Sirri

Presentata da:

Alessandro Mancini

Correlatori:

Dott. Alessandro Montanari

Dott.ssa Elisabetta Montagna

Anno Accademico 2021/2022

Abstract

DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) è un esperimento internazionale attualmente in costruzione al laboratorio Fermilab in Illinois, Stati Uniti. Il suo scopo sarà quello di studiare alcuni dei fenomeni e quesiti aperti che riguardano i neutrini: particelle debolmente interagenti facenti parte del Modello Standard. In particolare DUNE intende studiare il fenomeno dell'oscillazione di sapore dei neutrini, osservare neutrini provenienti da supernove e stelle di neutroni per studiarne la formazione e ricercare l'eventuale decadimento dei protoni. L'esperimento sarà formato da due siti sperimentali distanti circa 1300 km tra loro: il *Near Detector* situato a Fermilab ed il *Far Detector*, situato al Sanford Underground Research Facility (SURF) in South Dakota.

Questa tesi è rivolta in particolare al sistema di fotorivelazione del Far Detector, che utilizza fotomoltiplicatori al silicio (Silicon Photomultipliers, o SiPM). Questi dispositivi dovranno funzionare in condizioni criogeniche in argon liquido, perciò è stata avviata un'intensiva campagna di test volta alla caratterizzazione e validazione dei sensori che saranno montati nell'apparato. La sezione INFN di Bologna è coinvolta in questa campagna e dovrà testare una parte dei SiPM destinati all'impiego in DUNE. A tale scopo è stato realizzato, nei laboratori INFN, un sistema per il test di tali dispositivi in criogenia su larga scala.

L'attività di tesi ha previsto la caratterizzazione di diversi SiPM sia a temperatura ambiente sia in criogenia e l'analisi delle distribuzioni statistiche dei parametri di diversi campioni di SiPM.

Indice

Introduzione	1
1 I Neutrini e l'esperimento DUNE	3
1.1 Il neutrino nel modello standard	3
1.2 Breve storia dei neutrini	4
1.2.1 L'idea del neutrino	4
1.2.2 L'esperimento di Cowan e Reines	6
1.3 Introduzione all'oscillazione dei neutrini	7
1.4 L'esperimento DUNE	10
1.4.1 Panoramica generale	10
1.4.2 La produzione di un fascio di neutrini	11
1.4.3 I due detector di DUNE	12
1.4.4 Il Far Detector e il sistema di fotorivelazione	12
2 Fotomoltiplicatori al silicio	17
2.1 Introduzione	17
2.2 Fotodiodi al silicio	17
2.3 Fotomoltiplicatori al silicio	21
2.4 Sorgenti di rumore in un SiPM	23
2.4.1 Dark Current	23
2.4.2 Crosstalk ottico	24
2.4.3 Afterpulsing	24
3 Test di SiPM su larga scala	25
3.1 Fotomoltiplicatori al silicio in DUNE	25
3.2 Procedura di test di SiPM	27
3.3 Apparato di test	27
3.4 Curve corrente-tensione	31

INDICE

3.4.1	Analisi in polarizzazione diretta	31
3.4.2	Analisi in polarizzazione inversa	32
3.5	Cicli termici	33
4	Risultati ottenuti in laboratorio	35
4.1	Prestazioni di SiPM sottoposti a cicli termici	36
4.2	Uniformità delle tensioni di breakdown	38
	Conclusioni	43
	Bibliografia	45
	Ringraziamenti	47

Introduzione

DUNE sarà un grande esperimento che si occuperà di studiare la fisica dei neutrini e i problemi riguardanti il fenomeno dell'oscillazione dei neutrini e la violazione della simmetria CP.

I neutrini sono delle particelle elementari che fanno parte del Modello Standard ed esistono in tre diversi tipi, detti *sapori* in Fisica delle Particelle, indicati con ν_e , ν_μ , ν_τ associati ai tre leptoni carichi e^- , μ^- , τ^- . I neutrini sono delle particelle elettricamente neutre ed hanno una massa molto piccola, assunta nulla nel Modello Standard. I neutrini possono interagire con le altre particelle mediante interazione debole ed interazione gravitazionale e sono caratterizzati da una bassa probabilità di interazione, potendo viaggiare indisturbati attraverso enormi strati di materiale, senza essere assorbiti.

Una parte importante dell'esperimento DUNE saranno i rivelatori necessari per rivelare neutrini prodotti al Fermilab a 1300 km di distanza oppure provenienti dall'atmosfera e dallo spazio. I rivelatori saranno composti da camere a proiezione temporale contenenti migliaia di tonnellate di argon allo stato liquido ad una temperatura di circa -190°C . Le camere saranno equipaggiate con un sistema di fotorivelazione, necessario per rivelare la luce di scintillazione prodotta dalla propagazione delle particelle cariche secondarie originate dall'interazione dei neutrini.

Il sistema utilizzerà fotomoltiplicatori al silicio (Silicon Photomultipliers, SiPM), sensori basati sui fotodiodi a valanga. Questi dispositivi dovranno operare in condizioni criogeniche, immersi in argon liquido e dovranno rispettare specifici requisiti. Perciò è in atto una campagna di test in diversi Centri di Ricerca, che ne determini le loro proprietà e che dimostri che riescano ad operare in tali condizioni estreme.

Il gruppo INFN di DUNE Bologna collabora alla definizione delle procedure ed alla realizzazione della strumentazione di test di SiPM. In parti-

colare, dato l'elevato numero di SiPM che sarà necessario testare e validare per DUNE (circa 300000), è stato realizzato, a Bologna, un sistema per eseguire test su larga scala di tali sensori.

L'attività di tesi qui presentata ha previsto la partecipazione all'allestimento del sistema di test. Tramite tale setup ho eseguito diverse misure (sia a temperatura ambiente, sia in criogenia in azoto liquido) volte a caratterizzare qualche centinaio di SiPM, per ricavarne i parametri tecnici quali resistenza di quenching (R_q) e tensione di breakdown (V_{BD}). Ho anche condotto analisi statistiche su grandi campioni di SiPM per determinarne la distribuzione di questi parametri.

Nel primo capitolo si fornisce un'introduzione alla fisica dei neutrini, una descrizione dell'esperimento DUNE, dei suoi obiettivi e del suo sistema di fotorivelazione.

Nel secondo capitolo si descrivono i fotomoltiplicatori al silicio (SiPM), la fisica dei semiconduttori e dei fotodiodi, elementi di cui sono composti i SiPM.

Nel terzo capitolo è presentata la procedura, approvata dal DUNE Single Phase Photon Detection System Consortium, richiesta per eseguire un test completo dei sensori (caratterizzazione e cicli termici) ed una descrizione del sistema di test realizzato nella sezione INFN di Bologna.

Nel quarto capitolo, infine, sono presentate l'attività che ho eseguito in laboratorio, l'analisi dati ed i risultati ottenuti per i campioni di SiPM analizzati.

Capitolo 1

I Neutrini e l'esperimento DUNE

1.1 Il neutrino nel modello standard

Il *Modello Standard* della fisica delle particelle (SM, Standard Model) è una teoria fisica che descrive le particelle elementari e tre delle quattro interazioni fondamentali note in natura [1]: interazione elettromagnetica, interazione debole, interazione forte, tramite le quali le particelle interagiscono. L'interazione gravitazionale è la quarta, per la quale non si dispone di una descrizione integrata in tale modello. Il Modello Standard è una summa di tutte le scoperte in fisica delle particelle dell'ultimo secolo.

Le particelle possono essere classificate in diverse classi, primariamente come *leptoni* e *quark*. I primi possono interagire solamente con interazione gravitazionale, debole ed elettromagnetica, se dotati di carica elettrica, i secondi anche con interazione forte. Le tre interazioni dello SM sono descritte da *teorie di gauge* e prevedono l'esistenza di altre particelle: i *bosoni mediatori*. Quando due particelle si trovano sufficientemente vicine ed hanno abbastanza energia si scambiano un bosone mediatore con una certa probabilità e nel farlo si trasformano o emettono altre particelle.

I neutrini sono delle particelle elementari che appartengono alla classe dei leptoni e sono elettricamente neutri, quindi possono interagire con le altre particelle tramite l'interazione debole e l'interazione gravitazionale. Nel Modello Standard esistono neutrini con tre diversi sapori associati ai tre leptoni: neutrino elettronico ν_e , neutrino muonico ν_μ e neutrino tau ν_τ , a cui si aggiungono i tre corrispettivi antineutrini. Nel Modello Standard i neutrini sono fermioni con spin $1/2$ e senza massa, tuttavia esperimenti recenti hanno dimostrato che in realtà hanno una massa finita ma molto



Figura 1.1: Rappresentazione schematica del Modello Standard della fisica delle particelle.

piccola e di difficile misura. In Fig. 1.1, che mostra una rappresentazione del Modello Standard, per le masse dei neutrini sono riportati i limiti superiori noti [2]. In natura i neutrini sono prodotti da fenomeni nucleari, come il decadimento β , dalle supernove e dal Sole.

1.2 Breve storia dei neutrini

1.2.1 L'idea del neutrino

La storia dei neutrini iniziò intorno agli ultimi anni del 1800 con l'osservazione, da parte del fisico francese Henri Becquerel, del fenomeno oggi noto come decadimento β . Egli rilevò che alcuni sali di uranio riuscivano ad impressionare una lastra fotografica producendo dei raggi, chiamati raggi β da Rutherford, che potevano propagarsi nello spazio, attraversare strati di materiale o interagirvi, come nel caso delle lastre fotografiche di Becquerel. Tale fenomeno fu osservato successivamente, anche grazie al lavoro dei coniugi Curie, in altri materiali come radio, torio, polonio.

Nel 1900 Becquerel, misurando il rapporto massa/carica dei raggi β , trovò lo stesso risultato ottenuto da Thomson nello studio dei raggi catodici, che erano stati identificati come elettroni. Anche la radiazione β era, dunque, identificabile come composta da elettroni.

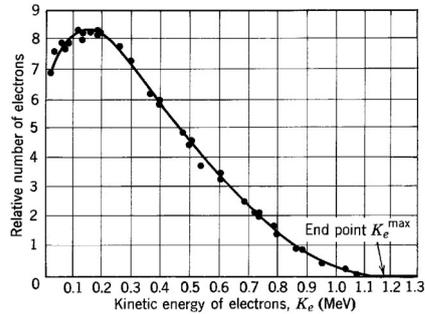


Figura 1.2: Tipico spettro energetico continuo di elettroni provenienti da decadimento β [3].

Successivamente si scoprì che i materiali che emettono radiazione β trasmutano in altri materiali, cambiando quindi numero atomico. Ciò suggerì che i protoni e neutroni, contenuti nei nuclei degli atomi, potessero trasformarsi gli uni negli altri a seguito di decadimenti. Tale fenomeno fu interpretato come un decadimento a due corpi: $X_Z^A \rightarrow X_{Z+1}^A + e^-$.

Questa interpretazione pose un problema: fu osservato che gli elettroni emessi da tale decadimento non hanno una ben definita energia, come invece accade per particelle emesse da decadimenti α [4], ma assumono uno spettro energetico continuo, come mostrato in Fig. 1.2.

L'idea di un decadimento a due corpi è incompatibile con l'osservazione sperimentale di uno spettro continuo di energie per gli elettroni emessi dal decadimento. Ci poteva essere, perciò, una nuova particella, leggera, neutra, che non era stato possibile osservare.

Nel 1930 il fisico Wolfgang Pauli avanzò l'idea che dal decadimento β originasse proprio questa nuova particella, che egli supposeva essere contenuta dentro il nucleo. Nel 1933 il fisico Enrico Fermi pubblicò il suo fondamentale lavoro sul decadimento β . Fermi accolse l'idea di Pauli e diede un nome alla nuova particella: la chiamò *neutrino*, per distinguerla dall'altra particella neutra, il neutrone. Inoltre l'idea innovativa di Fermi fu quella di supporre non che il neutrino fosse contenuto dentro il nucleo, ma che venisse generato dal decadimento, insieme all'elettrone. La teoria di Fermi sull'interazione debole, infatti, riprende le idee dell'Elettrodinamica Quantistica (Quantum Electrodynamics, QED) e le adatta a questa nuova interazione fondamentale: così come i fotoni possono essere creati o distrutti in QED anche le altre particelle come i neutrini possono farlo.

Il decadimento β assunse quindi la forma:

$$X_Z^A \rightarrow X_{Z+1}^A + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.1)$$

la quale può essere interpretata in termini di nucleoni:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.2)$$

In tale formulazione del decadimento compare un antineutrino elettronico: antiparticella del neutrino elettronico. Dalla teoria di Fermi si possono dedurre anche fenomeni inversi al decadimento β :

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

$$p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$$

1.2.2 L'esperimento di Cowan e Reines

La nuova particella, ipotizzata negli anni '30 da Pauli e successivamente Fermi, sembrava impossibile da rivelare: elettricamente neutra, leggera e con una probabilità di interazione molto bassa.

Nel 1956 Frederick Reines e Clyde Cowan, allora fisici ai laboratori di Los Alamos, New Mexico, costruirono un esperimento per provare l'esistenza dei neutrini. L'esperimento consisteva in due grandi contenitori pieni di acqua, per un totale di 200 litri, in cui erano disciolti dei sali di cadmio. L'apparato intendeva rivelare flussi di neutrini provenienti da un reattore nucleare: furono utilizzati il reattore di Hanford Site (Washington) nel 1953, poi quello di Savannah River Site (South Carolina) nel 1955.

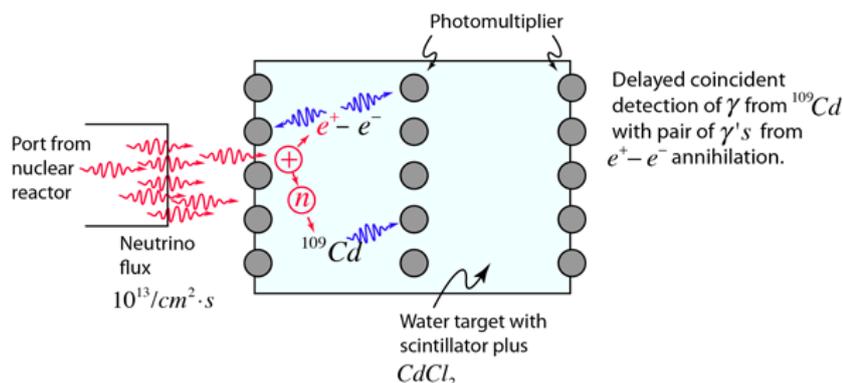


Figura 1.3: Schema dell'esperimento di Cowan e Reines. Il contenitore pieno d'acqua funge da bersaglio per il fascio di neutrini [5].

A seguito di un evento di interazione tra un antineutrino ed un protone si formano un positrone ed un neutrone, come schematizzato in Fig. 1.3.

Il primo va ad annichilarsi per interazione elettromagnetica con un elettrone, producendo due fotoni gamma secondo la reazione $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$. Questi due fotoni sono rivelabili tramite scintillatori posti nel contenitore che, a seguito dell'assorbimento dei raggi gamma, producono luce visibile poi convertita in segnale elettrico da tubi fotomoltiplicatori. Il neutrone, invece, è assorbito da un atomo di cadmio in soluzione, il quale passa ad uno stato eccitato, e nella diseccitazione produce un altro raggio gamma.

Il neutrino acquisisce così un segnale inconfondibile, coincidenza di due gamma da annichilazione e^+e^- , seguiti da un terzo gamma ritardato, dato dall'interazione tra neutrone e cadmio.

Reines e Cowan riuscirono ad osservare questi segnali ad un rate di circa tre eventi ogni ora. Si osservò, inoltre, che quando il reattore nucleare non era in funzione non si osservava alcun evento, dimostrando che si trattava proprio di neutrini provenienti dal reattore.

1.3 Introduzione all'oscillazione dei neutrini

L'oscillazione dei neutrini è un fenomeno quantomeccanico per il quale un neutrino prodotto con un dato sapore (ν_e, ν_τ, ν_μ) può essere rivelato successivamente con un sapore diverso, subendo quindi una variazione dello stesso durante la sua propagazione. Si tratta di un fenomeno teorizzato dal fisico Bruno Pontecorvo nel 1957 e successivamente osservato e studiato da diversi esperimenti, come GALLEX (LNGS), SNO, DAYA-BAY (esperimenti *in disappearance*), T2K, OPERA (LNGS) (esperimenti *in appearance*).

Il fenomeno dell'oscillazione è studiato con neutrini provenienti da diverse sorgenti: dal Sole, da reattore nucleare e da acceleratore. Quest'ultimo è uno dei metodi più efficaci poichè offre maggiore controllo sul fascio di neutrini prodotto, come nel caso di DUNE.

L'oscillazione è un fenomeno che manifesta la presenza di Fisica Oltre il Modello Standard (Beyond Standard Model, BSM), poichè richiede che i neutrini abbiano massa non nulla. La descrizione dell'oscillazione dei neutrini necessita della Meccanica Quantistica. Tale teoria prevede che per i neutrini esistano tre autostati di sapore ($\nu_\alpha = \nu_e, \nu_\tau, \nu_\mu$) e tre autostati di massa ($\nu_i = \nu_1, \nu_2, \nu_3$). Gli autostati di sapore sono combinazioni lineari degli autostati di massa:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

U è la matrice di Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (matrice PMNS) ed è una matrice unitaria.

Il caso di un'oscillazione a due neutrini risulta il più semplice da analizzare. Supponendo di osservare un'oscillazione tra i neutrini muonici ed elettronici la matrice PMNS si scrive come [6]:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

In cui θ è l'angolo di miscelamento. I due autostati di sapore si possono quindi scrivere come:

$$|\nu_e\rangle = |\nu_1\rangle \cos \theta + |\nu_2\rangle \sin \theta$$

$$|\nu_\mu\rangle = -|\nu_1\rangle \sin \theta + |\nu_2\rangle \cos \theta$$

Quando i neutrini vengono prodotti da un'interazione debole si trovano in un autostato di sapore definito, a cui corrisponde una data combinazione lineare di autostati di massa. Questi ultimi obbediscono all'equazione di Schroedinger e subiscono un'evoluzione temporale durante la propagazione del neutrino. L'evoluzione temporale di un autostato di massa si può scrivere come un'onda piana (secondo l'equazione di Schroedinger): $|\nu_i(t)\rangle = |\nu_i(0)\rangle e^{-\frac{i}{\hbar}E_i t}$. Un neutrino prodotto in un autostato $|\nu_\mu\rangle$ evolverà come:

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle e^{-\frac{i}{\hbar}E_1 t} + \cos \theta |\nu_2\rangle e^{-\frac{i}{\hbar}E_2 t}$$

In cui, secondo la relazione energia-impulso, $E_1^2 = (pc)^2 + (m_1c^2)^2$ e $E_2^2 = (pc)^2 + (m_2c^2)^2$ ed è stato posto $p_1 = p_2 = p$ (i due autostati di massa hanno lo stesso impulso). Per neutrini relativistici ($E \gg mc^2$) si utilizza l'approssimazione:

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} = p \sqrt{1 + \frac{m_i^2}{p^2}} \approx p + \frac{1}{2} \frac{m_i^2}{p}$$

(si è posto $c = 1$) in cui si può anche assumere $p \approx E_\nu$. Da cui si ottiene l'evoluzione:

$$|\nu_\mu(t)\rangle = e^{-i\left(p + \frac{1}{2} \frac{m_1^2}{p}\right)t} \left(-\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle e^{i\left(\frac{1}{2} \frac{m_1^2 - m_2^2}{p}\right)t} \right)$$

Si definiscono $L = tc$, $z = p + \frac{1}{2} \frac{m_1^2}{p} t$ e $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$, che rappresenta la differenza tra i quadrati delle masse dei due autostati di massa.

1.3. INTRODUZIONE ALL'OSCILLAZIONE DEI NEUTRINI

Dalla trattazione quantistica è possibile calcolare la probabilità che il neutrino generato nell'autostato $|\nu_\mu\rangle$, venga a trovarsi nell'altro autostato $|\nu_e\rangle$:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2 = \left| e^{-iz} \left(-\sin\theta \cos\theta + \sin\theta \cos\theta e^{i\frac{\Delta m^2}{2E}L} \right) \right|^2 = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 c^4}{4\hbar c} \frac{L}{E_\nu}\right)$$

in cui sono state reinserite le costanti \hbar, c .

Dall'espressione della probabilità è chiaro che si manifesta un fenomeno di oscillazione del sapore per cui il neutrino verrà a trovarsi ciclicamente in autostati di sapore muonico ed elettronico.

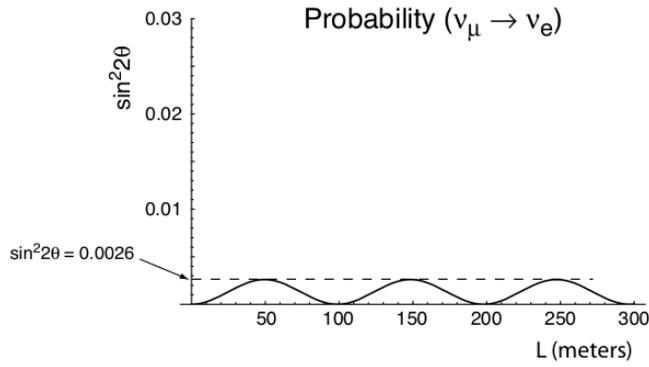


Figura 1.4: Andamento del fattore $\sin^2(2\theta)$, da cui dipende la probabilità di oscillazione di neutrini $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$, per un dato valore di θ e per un fascio monoenergetico di neutrini ν_μ . [6]

Tale probabilità ha il massimo in $\sin^2(2\theta)$ e dipende dalla distanza L dal punto in cui il neutrino è stato creato. In Fig. 1.4 si vede l'andamento del fattore $\sin^2(2\theta)$ per un valore fissato di θ . I moderni esperimenti di fisica dei neutrini, come DUNE, studiano un fascio di neutrini ad una data distanza dalla sua creazione e sono composti da un *Near Detector* che caratterizza il fascio appena creato, ed un *Far Detector* che rivela il fascio ad una data distanza. In particolare il parametro che è importante conoscere è il rapporto L/E tra la distanza a cui si osserva il fascio e l'energia dello stesso. DUNE è progettato con $L \approx 1300$ km.

1.4 L'esperimento DUNE

1.4.1 Panoramica generale

Il Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) è un esperimento internazionale attualmente in costruzione in America, il cui scopo principale sarà studiare e comprendere i fenomeni fisici che riguardano i neutrini e alcune delle loro implicazioni. In Fig. 1.5 è riportata una schematizzazione del suo design.

Tra gli obiettivi principali dell'esperimento rientrano [7]:

- studiare il fenomeno dell'oscillazione dei neutrini e determinare l'ordinamento delle masse dei tre sapori di neutrini;
- studiare supernove, formazione di buchi neri e stelle di neutroni;
- osservare un ipotetico decadimento del protone.

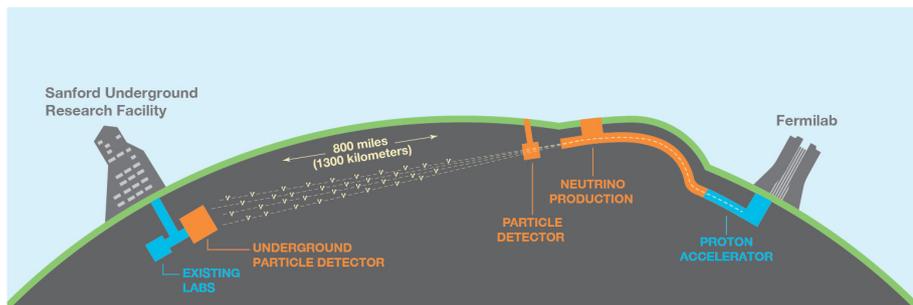


Figura 1.5: Schema dell'esperimento DUNE: i due siti sperimentali del Near Detector e Far Detector posti ad una distanza di circa 1300 km.

L'esperimento utilizzerà sia neutrini naturali, ad esempio provenienti da supernove, sia neutrini da acceleratore. I secondi saranno prodotti dal Long Baseline Neutrino Facility (LBNF) a Fermilab. I neutrini saranno poi rivelati da due detector: uno situato vicino alla sorgente di neutrini, Near Detector e l'altro, Far Detector, situato a circa 1300 km di distanza, a Sanford Underground Research Facility (SURF) in South Dakota. L'esperimento DUNE cercherà di rispondere a domande sull'Universo, come ad esempio l'asimmetria che esiste tra materia ed antimateria e perché la prima sia presente in prevalenza.

1.4.2 La produzione di un fascio di neutrini

Il Long Baseline Neutrino Facility (LBNF) fornirà il fascio di neutrini necessario per l'esperimento DUNE [8]. Per produrre un tale fascio si utilizzano una serie di processi e decadimenti, tra i cui prodotti finali ci sono i neutrini desiderati.

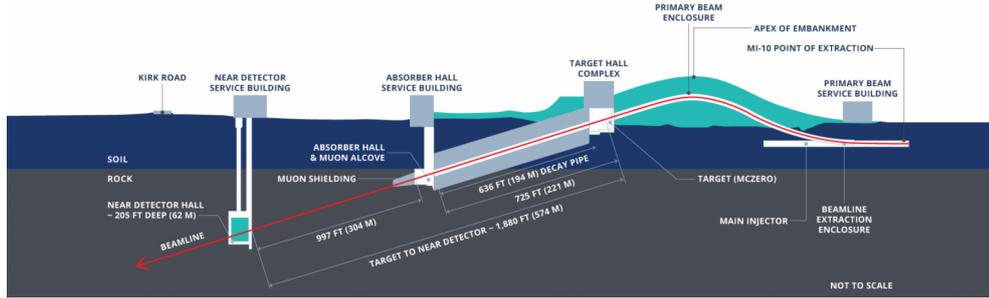


Figura 1.6: Schema del fascio LBNF a Fermilab.

Il processo, schematizzato in Fig. 1.6, comincia in un acceleratore di particelle (Proton Improvement Plan, PIP-II) a Fermilab, che accelera fasci di protoni su una distanza di circa 215 metri fino ad un'energia massima di 800 MeV [9]. Successivamente i protoni sono diretti contro un bersaglio di grafite e dalle collisioni tra fascio e bersaglio si producono mesoni, tra cui principalmente pioni (π^\pm). Questi ultimi, essendo elettricamente carichi, possono essere collimati da appositi magneti in modo da ottenere un fascio secondario. Successivamente i pioni decadono in un tunnel (decay pipe) producendo neutrini ed antineutrini muonici, secondo le reazioni:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

Tramite il campo magnetico è possibile selezionare il segno della carica dei pioni, per cui risulta possibile ottenere un fascio di neutrini muonici oppure antineutrini muonici. Al termine della decay pipe tutte le particelle sopravvissute (pioni, protoni, kaoni, muoni...) sono assorbite nella roccia, lasciando un fascio composto unicamente da neutrini o antineutrini muonici. Questo fascio prodotto a Fermilab è inizialmente rivelato dal Near Detector per un'iniziale caratterizzazione, dopodiché attraversa circa 1300 km di roccia per giungere fino al Far Detector, in South Dakota.

1.4.3 I due detector di DUNE

L'esperimento DUNE sarà costituito da due rivelatori di neutrini chiamati Near Detector e Far Detector. Il Near Detector si troverà a Fermilab e sarà il primo rivelatore che i neutrini attraverseranno, situato a 62 metri di profondità ed utilizzato per caratterizzare il fascio di neutrini. Il Near Detector sarà composto da una serie di apparati con diverse tecnologie di rivelazione e diversi bersagli [10].

Il fascio generato a Fermilab è diretto verso il sito del Far Detector, distante circa 1300 km dal Near Detector e situato a Sanford Underground Research Facility (SURF), in South Dakota.

Il Far Detector sarà costituito da quattro moduli situati in caverne sotterranee ad una profondità di circa 1.5 km. Ogni modulo sarà costituito da una camera a proiezione temporale riempita da 17000 tonnellate di argon liquido, instrumentata con un sistema di fotorivelazione. Tutta la camera sarà mantenuta ad una temperatura di circa -184°C [11].

1.4.4 Il Far Detector e il sistema di fotorivelazione

Il Far Detector di DUNE sarà uno dei più grandi rivelatori di neutrini costruiti finora e sarà composto da quattro moduli di camere a proiezione temporale, ognuna contenente 17000 tonnellate di argon liquido, per un totale di circa 70000 tonnellate. In Fig. 1.7 è mostrato uno dei quattro moduli di DUNE. Il volume di ogni modulo, riempito di argon liquido, è suddiviso in quattro sezioni, che costituiscono rivelatori LArTPC (Liquid Argon Time Projection Chamber), schematizzate in Fig. 1.9.

Una LArTPC è una tipologia di rivelatore utilizzata per ricostruire i vertici di interazione dei neutrini con gli atomi di argon. Essa utilizza un mezzo (argon liquido) sottoposto ad un intenso campo elettrico (500 V/cm nel caso di DUNE) ottenuto tramite una parete che funge da catodo ed una che funge da anodo. Quest'ultima è composta da tre piani di cavi (piani anodici). In DUNE i piani anodici sono realizzati con moduli detti Anode Plane Assemblies (APA), mostrati in Fig. 1.9 ed in dettaglio in Fig. 1.10.

In Fig. 1.8 è schematizzato il meccanismo di funzionamento di un rivelatore LArTPC: a seguito di un'interazione tra neutrino e nucleo di argon sono prodotte nuove particelle cariche (vertice di interazione). Queste ionizzano atomi di argon lungo il percorso liberando elettroni (elettroni di drift) che sono accelerati dal campo elettrico e poi rivelati, come segnali di corrente elettrica, dai piani anodici. Tale processo ha una durata dell'ordine del millisecondo. Rivelando gli elettroni di drift si riescono a

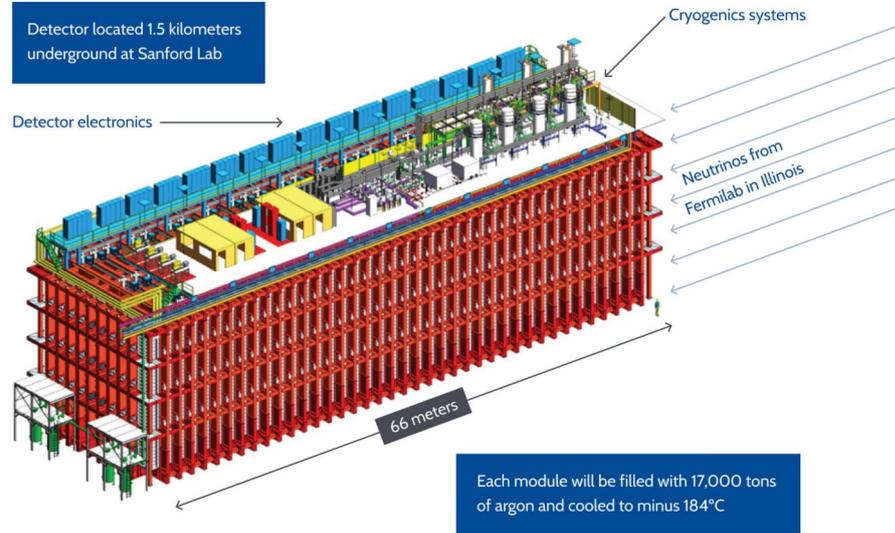


Figura 1.7: Schema di una delle quattro camere a proiezione temporale del Far Detector, riempita con circa 17000 tonnellate di argon liquido e dotata di un sistema di fotorivelazione.

ricostruire tracce bidimensionali, che sono la proiezione, sui piani anodici, delle tracce tridimensionali delle particelle cariche prodotte nel vertice di interazione. Le tracce tridimensionali si possono ricostruire mediante il sistema di fotorivelazione, montato sugli APA.

Un nucleo di argon, a seguito di un'interazione con un neutrino, emette, durante la diseccitazione, luce di scintillazione VUV (Vacuum Ultra Violet) con lunghezza d'onda con picco a 127 nm. Questa luce VUV si propaga molto più velocemente degli elettroni di drift, e può essere rivelata dal sistema di fotorivelazione. Ciò permette quindi di stabilire un istante di tempo t_0 rispetto al quale si misurano i tempi di rivelazione degli elettroni di drift. Questo equivale a misurare il tempo che gli elettroni impiegano, dal momento in cui sono generati, per arrivare ai rivelatori sui piani anodici. Questa misura temporale, assieme a misure sulle velocità di drift degli elettroni, permette infine di aggiungere la terza coordinata alle tracce e ricostruire il vertice di interazione 3D del neutrino.

In Fig. 1.9 si può vedere come il volume di un modulo del Far Detector sia suddiviso in quattro diverse LArTPC: le pareti C , A sono i piani catodici e anodici.

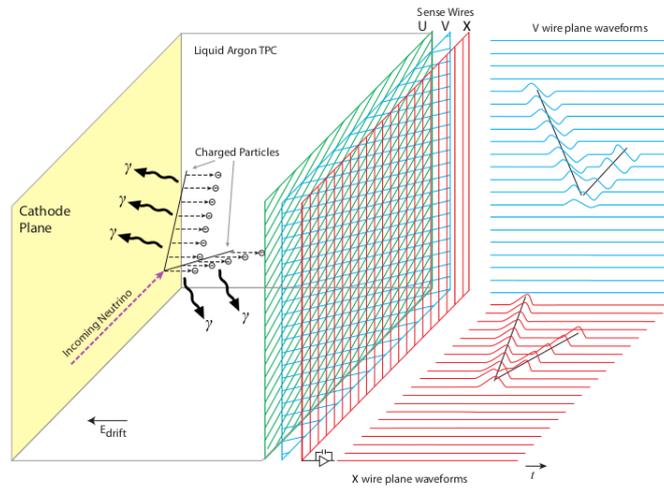


Figura 1.8: Schema di un rivelatore LArTPC (Liquid Argon Time Projection Chamber). Un neutrino che interagisce con un nucleo di argon produce delle particelle cariche che nel loro percorso liberano elettroni (elettroni di drift), che sono accelerati dal campo elettrico della LArTPC. Questi elettroni sono raccolti e rivelati dai piani anodici (linee blu e rosse inclinate) e permettono una ricostruzione che è la proiezione 2D del vertice di interazione.

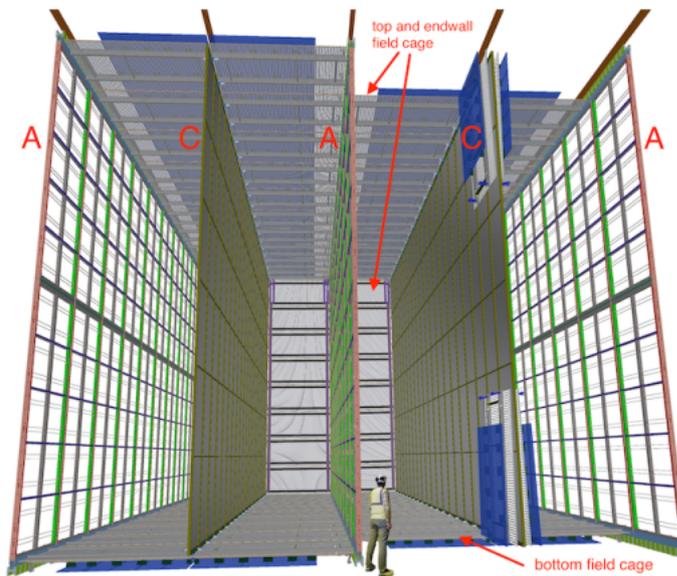


Figura 1.9: Disposizione delle quattro LArTPC dentro un modulo del Far Detector [12]. C sono i piani catodici, A i piani anodici, in cui è inserito il sistema di fotorivelazione.

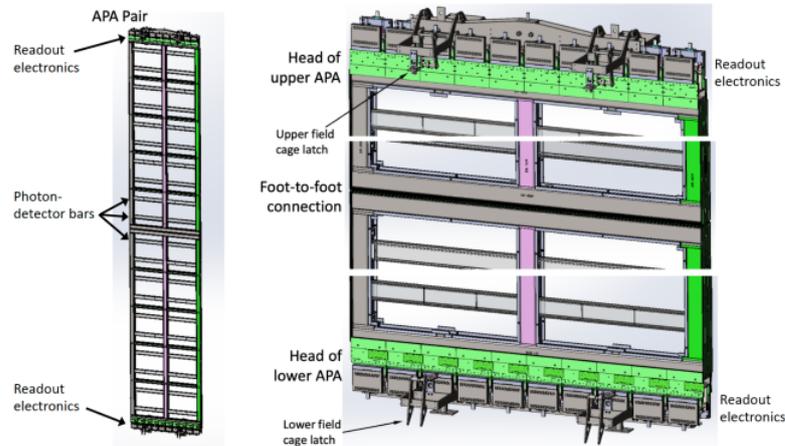


Figura 1.10: A sinistra: schema di una coppia di Anode Plane Assemblies (APA) per il Far Detector, in cui sono visibili le matrici del sistema di fotorivelazione (photon-detector bars). A destra: zoom delle parti sottostante e soprastante dei due APA [12].

Nel design di DUNE i piani anodici sono suddivisi in moduli più piccoli detti Anode Plane Assemblies (APA), che alloggiavano i rivelatori di elettroni, il sistema di fotorivelazione e parte dell'elettronica di acquisizione. Il sistema di fotorivelazione si compone di diverse matrici di fotorivelazione, che sono alloggiati negli APA come mostrato in Fig. 1.10.

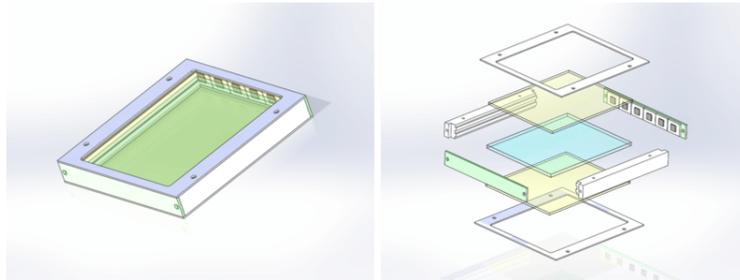


Figura 1.11: A sinistra schema di una cella X-Arapuca, a destra sua rappresentazione in esploso. Si notano i fotomoltiplicatori al silicio (SiPM) installati sui lati lunghi.

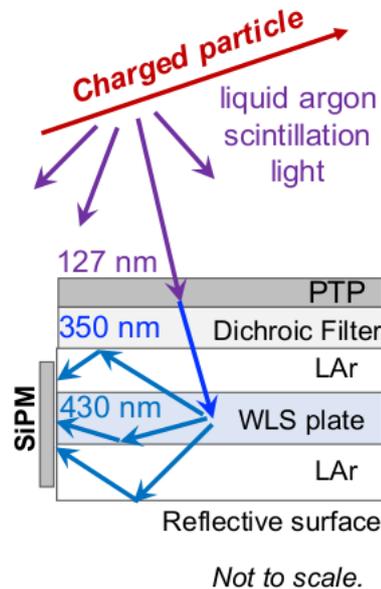


Figura 1.12: Sezione trasversale di una cella X-Arapuca. I fotoni incidenti VUV sono traslati in luce visibile, intrappolati per riflessione totale e rivelati dai SiPM.

Ogni matrice di fotorivelazione è composta da diverse celle fotorivelatrici dette X-Arapuca, raffigurate in Fig. 1.11. Ogni cella è composta da più strati di materiali diversi ed ha lo scopo di catturare la luce VUV di scintillazione dell'argon, e spostarne la lunghezza d'onda verso il visibile, a cui sono maggiormente sensibili i SiPM [13]. La Fig. 1.12 riporta una sezione non in scala di una cella X-Arapuca e i materiali di cui si compone. Uno strato di p-terfenile (PTP) riveste l'esterno della cella. All'interno si trova una piastra (wavelength shifting, WLS plate) che funge da guida per i fotoni verso i SiPM, che li rivelano come segnale elettrico. La cella è costruita in modo che i fotoni che vi entrano rimangano intrappolati per riflessione totale, fino ad essere rivelati. I fotomoltiplicatori al silicio (SiPM) sono i dispositivi scelti per il sistema di fotorivelazione poiché sono di dimensioni ridotte rispetto ai tubi fotomoltiplicatori e non hanno impatto sul volume sensibile del rivelatore LArTPC.

Capitolo 2

Fotomoltiplicatori al silicio

2.1 Introduzione

I fotomoltiplicatori al silicio (Silicon Photomultipliers, SiPM) sono sensori elettronici allo stato solido sensibili alla luce, a livello di singolo fotone, composti da fotodiodi a valanga (Single-Photon Avalanche Diode, SPAD), che sfruttano la fisica e le proprietà dei materiali semiconduttori per convertire la luce in un segnale elettrico. I fotodiodi che compongono un SiPM hanno dimensioni molto piccole: dell'ordine della decina o centinaia di μm e sono posti su un substrato comune di silicio.

I SiPM hanno aree sensibili dell'ordine di qualche mm^2 e possono alloggiare fino a 10000 SPAD per millimetro quadrato. I SiPM hanno sensibilità dalla luce UV fino all'infrarosso, con picco nel visibile (400 nm - 500 nm) [14].

2.2 Fotodiodi al silicio

I fotodiodi sono un particolare tipo di diodo sensibile alla luce. L'elemento fondamentale è la giunzione p-n, ottenuta ponendo a contatto un semiconduttore, spesso silicio, drogato di tipo p ed uno drogato di tipo n.

I semiconduttori si dicono drogati, o estrinseci, quando contengono delle impurezze inserite appositamente nel loro reticolo cristallino. I semiconduttori più usati sono silicio e germanio: elementi del gruppo 14 della tavola periodica, con 4 elettroni di valenza. In semiconduttori drogati n si aggiungono come impurezze degli atomi detti *donatori* facenti parte del gruppo 15, con 5 elettroni di valenza. In questi semiconduttori si crea un eccesso di elettroni liberi di conduzione. In semiconduttori drogati p si aggiungono atomi detti *accettori* facenti parte del gruppo 13, con 3 elet-

troni di valenza, che accettano un elettrone ciascuno dagli atomi di silicio. In tali semiconduttori si ha un difetto di elettroni liberi, ossia un eccesso di *lacune elettroniche*.

Nella fisica dei semiconduttori le lacune assumono un ruolo importante, poichè si possono muovere, sotto l'azione di un campo elettrico, così come possono farlo gli elettroni. Nei semiconduttori la corrente ha perciò due contributi: uno dato dal moto di elettroni (e^-) ed uno dal moto delle lacune elettroniche (h^+) [15]. Le cariche presenti in maggior quantità in un semiconduttore sono dette *maggioritarie*, mentre *minoritarie* quelle presenti in minor quantità, perciò gli elettroni saranno maggioritari in un semiconduttore n, mentre minoritari in un p, viceversa per le lacune.

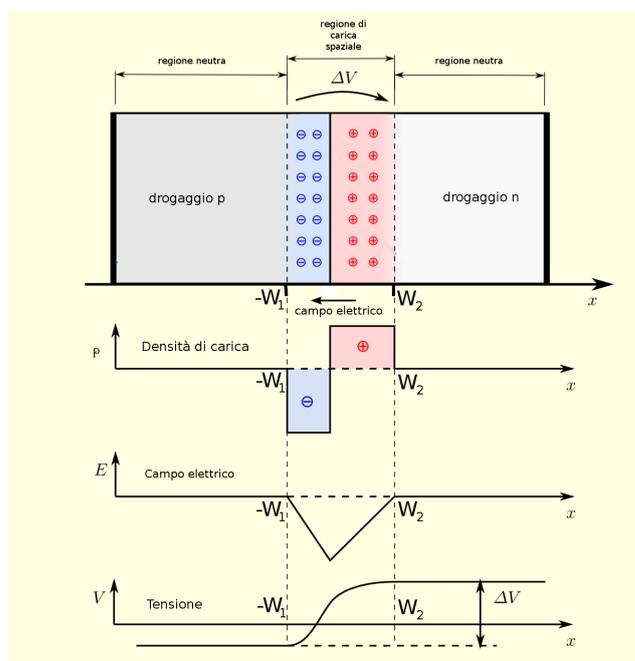


Figura 2.1: Giunzione p-n e andamenti di densità di carica, campo elettrico e tensione.

Ponendo a contatto un semiconduttore p con uno n si ottiene la giunzione p-n, schematizzata in Fig. 2.1. Nella zona di contatto le cariche h^+ ed e^- diffondono attraverso la giunzione e si ricombinano, creando una regione priva di cariche libere detta *depletion region* o *regione di svuotamento*. In tale regione si raggiunge una situazione di equilibrio in cui si instaurano un campo elettrico ed una differenza di potenziale (potenziale di contatto), i cui andamenti sono graficati in Fig. 2.1.

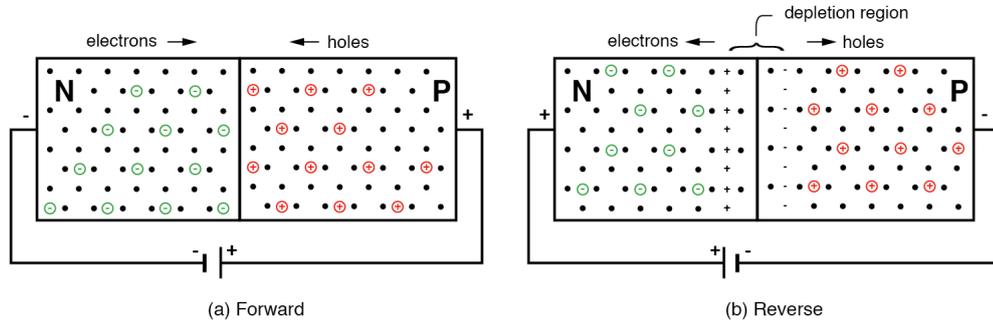


Figura 2.2: Diodo polarizzato direttamente (a) ed inversamente (b).

Una giunzione p-n a cui è applicata una tensione di polarizzazione, detta tensione di bias, assume il nome di diodo. Esistono due regimi di polarizzazione: diretta e inversa. In Fig. 2.2 sono riportati i comportamenti del diodo nelle due diverse polarizzazioni.

In polarizzazione diretta la regione p è posta a potenziale maggiore della regione n e si ha un restringimento della depletion region, con conseguente abbassamento della barriera di potenziale del diodo. I portatori di carica maggioritari (elettroni nella zona n e lacune nella zona p) possono diffondere da una regione all'altra determinando una corrente elettrica significativa: le lacune diffondono dalla regione p alla regione n, viceversa gli elettroni.

In polarizzazione inversa la regione p è posta a potenziale minore della regione n. La tensione inversa provoca un allargamento della depletion region, un innalzamento della barriera di potenziale del diodo e del campo elettrico nella giunzione e la diffusione di cariche maggioritarie è ostacolata. Si instaura una corrente, detta corrente inversa di saturazione I_0 , data dalla diffusione di cariche minoritarie attraverso la giunzione: lacune dalla regione n alla regione p e viceversa per gli elettroni. Tale corrente ha un valore molto piccolo, dell'ordine del μA o nA . Questa corrente è dovuta a fenomeni di creazione e annichilazione di coppie e^- , h^+ a causa dei moti di agitazione termica nei materiali. Le cariche minoritarie riescono a diffondere, indipendentemente dalla tensione di bias applicata e vanno a costituire la corrente I_0 .

In Fig. 2.3a è riportata la caratteristica I-V di un diodo, che assume la seguente forma:

$$I(V) = I_0 \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

valida per polarizzazione diretta ed inversa per valori di tensione inferiori alla tensione di breakdown. η e V_T sono costanti che dipendono rispet-

tivamente dal tipo di diodo e dalla temperatura. Per tensione positiva (polarizzazione diretta) la corrente aumenta esponenzialmente con la tensione. Per tensione negativa (polarizzazione inversa) la corrente rimane limitata alla corrente inversa di saturazione I_0 . Per tensioni di bias inverse molto elevate e superiori ad un valore, detto tensione di breakdown V_{BD} , si osserva un repentino aumento della corrente e l'espressione 2.1 non descrive il comportamento di un diodo in questa regione. Il fenomeno di breakdown è dovuto al fatto che le cariche minoritarie che diffondono attraverso la giunzione sono accelerate da un intenso campo elettrico dovuto alla tensione di bias ed acquisiscono una grande energia cinetica. Nel loro percorso possono riuscire a produrre altre coppie elettrone-lacuna, innescando così un effetto valanga, che produce correnti elevate. I diodi che utilizzano questo fenomeno fisico sono detti diodi a valanga.

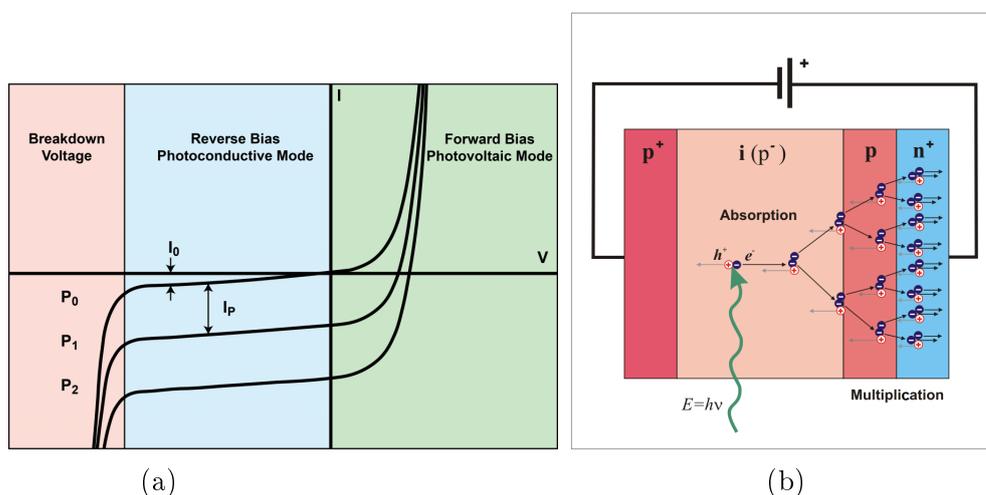


Figura 2.3: (a) Caratteristica I-V di un fotodiode. La corrente di saturazione inversa I_0 aumenta in modulo con l'aumentare dell'illuminazione. I_p indica il contributo della corrente fotoprodotta. (b) Schema di un fotodiode in cui è in atto una valanga.

I fotodiodi a valanga (Avalanche Photo Diode, APD) sono particolari diodi sensibili alla luce [15]: sono formati da una giunzione p-n e da uno strato di materiale semiconduttore non drogato, che determina un'estesa depletion region (Fig. 2.3b). I fotodiodi operano in polarizzazione inversa ed in questo strato di semiconduttore non drogato si instaura un intenso e costante campo elettrico. Se un fotone incidente possiede un'energia abbastanza alta può creare una coppia elettrone-lacuna. Se quest'ultima è creata all'interno della depletion-region, allora le due cariche (e^- , h^+)

sono separate dal campo elettrico. Con tensione di polarizzazione inversa abbastanza alta ($|V| > |V_{BD}|$) si può ottenere effetto valanga e quindi una corrente elevata.

In Fig. 2.3a si osservano diverse caratteristiche I-V per fotodiode in dipendenza dall'illuminazione. Per illuminazione elevata la corrente inversa di saturazione aumenta per via del contributo di corrente fotoprodotta, indicata con I_p in figura. Un fotodiode che utilizza il meccanismo a valanga (*regime di Geiger*) è detto Single Photon Avalanche Diode (SPAD).

2.3 Fotomoltiplicatori al silicio

I fotomoltiplicatori al silicio (Silicon Photomultiplier, SiPM) sono sensori costituiti da un array di fotodiode (SPAD), detti pixel o microcelle, collegati elettricamente in parallelo su un substrato comune di silicio, come schematizzato in Fig. 2.4 [16]. Ogni pixel ha in serie una resistenza, detta *resistenza di quenching* (R_q).

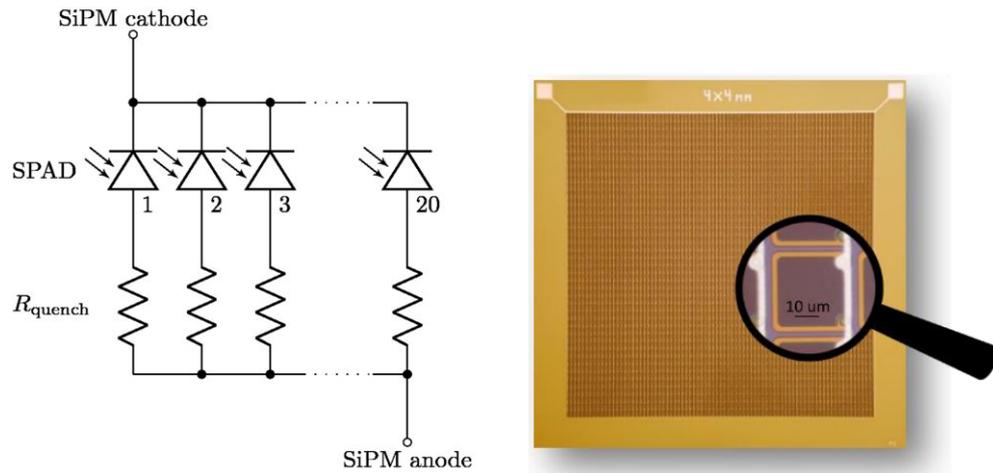


Figura 2.4: (a) Schema di un array di fotodiode che costituiscono un SiPM. (b) Rappresentazione di un SiPM e delle sue microcelle (pixel o SPAD).

Un SiPM opera in polarizzazione inversa e la tensione ad esso applicata è detta *tensione di bias* (V_{bias}), la quale è mantenuta costante ad un valore in modulo leggermente superiore alla tensione di breakdown V_{BD} (regime di Geiger). La tensione a cui opera un SiPM è perciò $V_{bias} = V_{BD} + \Delta V$, in cui ΔV è detta *overvoltage*, di solito intorno a qualche Volt. Valori tipici di V_{BD} possono variare tra la decina e qualche centinaio di Volt.

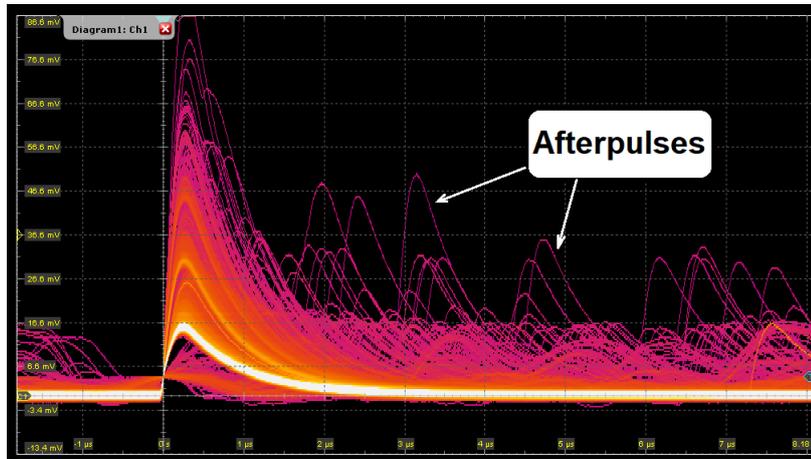


Figura 2.5: Segnali di tensione di SiPM osservati ad oscilloscopio. Si nota una fase di salita seguita da una di discesa. I diversi picchi sono quantizzati e corrispondono al numero di fotoelettroni. Sono evidenziati gli afterpulses.

Quando si crea una coppia elettrone-lacuna all'interno della depletion region di una microcella, ad esempio a causa di un fotone, queste due cariche sono separate dal campo elettrico ed innescano una valanga, provocando una fotocorrente. La resistenza di quenching R_q ha lo scopo di arrestare la valanga e riportare la microcella alla situazione iniziale. Ogni pixel ha quindi un tempo di recupero richiesto, da quando viene innescata una valanga, per tornare operativo e sensibile ad altri fotoni. Tale tempo di recupero è dato da: $\tau_{RC} = R_q C$, in cui C è una capacità associata alla microcella.

In un SiPM i pixel sono indipendenti tra di loro: quando uno assorbe un fotone gli altri rimangono operativi. Il segnale di un SiPM è la somma dei segnali dei singoli pixel.

Il segnale di un SiPM si può visualizzare con un oscilloscopio (Fig. 2.5). Tale segnale ha un tempo di salita, un tempo di discesa ed ha un picco quantizzato: l'altezza del picco è dato dal numero di microcelle che sono state attivate simultaneamente. Se più celle sono attivate contemporaneamente il segnale del SiPM è la somma dei segnali delle singole celle, perciò all'oscilloscopio appare con un picco quantizzato. Se, invece, una cella è attivata da più fotoni contemporaneamente, il segnale totale apparirà come il segnale di una singola cella, non riuscendo a distinguere i due fotoni.

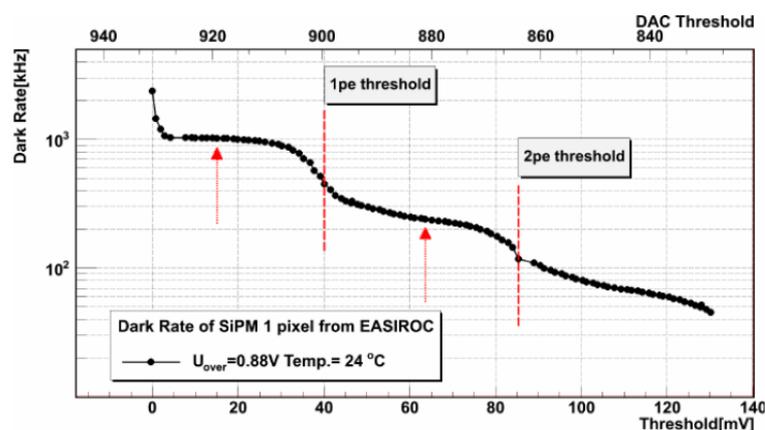


Figura 2.6: Staircase Curve per studio di sorgenti di rumore [18].

2.4 Sorgenti di rumore in un SiPM

I SiPM sono sensori che presentano alcune sorgenti di rumore che producono segnali non dovuti alla rivelazione di luce, che vanno a sovrapporsi agli altri segnali e vanno tenuti quindi in considerazione, soprattutto per contesti in cui si lavora a basse luminosità (pochi fotoni).

2.4.1 Dark Current

La dark current, o *corrente di buio*, è la sorgente primaria di rumore in un SiPM. Si tratta di corrente che si origina anche in assenza di luce. La dark current è dovuta a portatori di carica originati all'interno della depletion region per via dell'agitazione termica dei materiali di cui è composto un SiPM. Tali portatori di carica possono generare valanghe e produrre segnali identici a quelli dei fotoni.

Quando si opera in condizioni di bassa luminosità la dark current diventa una sorgente di rumore particolarmente importante poiché si hanno pochi fotoni incidenti.

Il *DCR* (Dark Count Rate) è un parametro che quantifica quante valanghe dovute a rumore per unità di superficie e di tempo sono osservate in un SiPM, e si misura perciò in Hz/m^2 . Il DCR dipende dall'overvoltage e dalla temperatura a cui si opera [17]. A temperatura ambiente si hanno valori di DCR intorno a $100 \text{ kHz}/\text{mm}^2$, mentre a 100 K il valore si riduce a $\sim 100 \text{ Hz}/\text{mm}^2$. Per studi di DCR su SiPM si utilizza la *staircase curve*: curva che mostra l'andamento di DCR in funzione della soglia (threshold) di rivelazione, come mostrato in Fig. 2.6. In tale grafico, aumentando la soglia, si vanno a selezionare segnali indotti da uno o più fotoelettroni.

2.4.2 Crosstalk ottico

Il crosstalk è una sorgente di rumore dovuta al fatto che i pixel di un SiPM, progettati per lavorare indipendentemente, in realtà possono interagire tra loro.

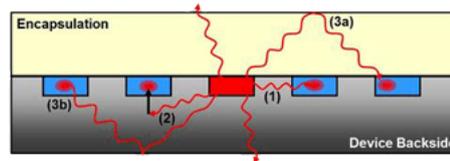


Figura 2.7: Rappresentazione del fenomeno di crosstalk: un pixel in cui si instaura una valanga può generare fotoni che causano valanghe in celle vicine.

Quando in un pixel si innesca una valanga accade che le cariche accelerate dal campo elettrico producono fotoni che possono migrare verso i pixel vicini, innescando così altre valanghe e producendo segnali, dati dalla somma dei segnali delle diverse valanghe, con picchi più alti. Il fenomeno è schematizzato in Fig. 2.7.

La probabilità di crosstalk è definita come la probabilità che una valanga innescata in un pixel ne vada ad innescare un'altra in celle adiacenti. Tale probabilità può essere ridotta isolando il più possibile i pixel, ad esempio aumentandone la distanza relativa oppure introducendo dei solchi (*trench*).

2.4.3 Afterpulsing

L'afterpulsing è un fenomeno per il quale le cariche originate durante una valanga possono rimanere intrappolate nelle impurità reticolari del semiconduttore ed essere rilasciate dopo un certo tempo caratteristico innescando valanghe successive. Tale fenomeno aumenta con l'aumentare della tensione di polarizzazione. La Fig. 2.5 mostra degli afterpulses e altre sorgenti di rumore in un segnale di SiPM ad oscilloscopio.

Capitolo 3

Test di SiPM su larga scala

3.1 Fotomoltiplicatori al silicio in DUNE

I SiPM saranno la tecnologia utilizzata per rivelare fotoni nel Far Detector dell'esperimento DUNE. Tali sensori saranno disposti in array a gruppi di 6 su PCB (Fig. 3.1) ed alloggiati nelle celle X-Arapuca, con 2 PCB per ogni cella. In ogni array i 6 SiPM sono collegati elettricamente in parallelo, con un catodo comune (K) e 6 anodi numerati da A1 ad A6.

Le celle X-Arapuca saranno disposte in gruppi detti supercelle, contenenti 6 X-Arapuca ciascuno. Un modulo di fotorivelazione (Fig. 3.2a) sarà infine composto da 4 supercelle, quindi da 48 array. I SiPM dovranno operare a temperatura criogenica (circa 87 K). A basse temperature si osservano differenze nelle caratteristiche dei SiPM rispetto a condizioni di temperatura ambiente. Si hanno infatti un abbassamento (in modulo) della tensione di breakdown ed un innalzamento della resistenza di quenching. Si osserva poi un DCR molto più basso, data la minore agitazione termica [17].

I SiPM che saranno utilizzati in DUNE sono prodotti da Fondazione Bruno Kessler (FBK, Trento) e Hamamatsu Photonics K.K. (HPK, Giap-



Figura 3.1: PCB (Printed Circuit Board) con 6 SiPM prodotto da FBK (Fondazione Bruno Kessler) per cella X-Arapuca.

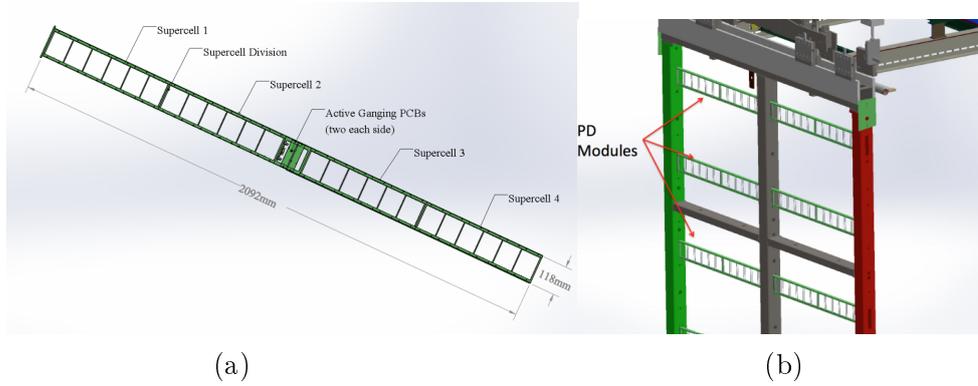


Figura 3.2: (a) Design di modulo di fotorivelazione di DUNE, da alloggiare negli APA (Anode Plane Assemblies), composto da 4 supercelle, ognuna contenente 6 celle X-Arapuca. (b) Moduli di fotorivelazione montati su APA [12].

pone). Tali sensori dovranno rispettare particolari requisiti, data l'estrema condizione a cui dovranno operare e i rari eventi che dovranno rivelare. Innanzitutto sarà richiesta un'opportuna robustezza del packaging, che sarà soggetto a forti stress termici. Si richiede poi un adeguato studio delle diverse sorgenti di rumore e caratterizzazione di DCR, che dovrà essere inferiore a 100 mHz/mm^2 .

Affinchè la risposta del sistema di fotorivelazione sia uniforme è importante anche la distribuzione dei valori di V_{BD} dei SiPM montati nelle celle X-Arapuca, che dovrà essere il più uniforme possibile, dato che i 6 SiPM su un PCB saranno alimentati dalla stessa tensione di bias. Valori molto diversi di V_{BD} , infatti, implicherebbero valori diversi di tensione di bias necessari per far avvenire moltiplicazioni a valanga.

Tutti questi stringenti requisiti pongono necessaria un'intensiva campagna di test. Il DUNE Single Phase Photon Detection System Consortium è un consorzio internazionale che si occupa del sistema di fotorivelazione e di approvare le procedure standard di test di SiPM.

Diversi Centri di Ricerca e Università sono coinvolti in questa campagna, che dovrà caratterizzare e testare centinaia di migliaia di sensori (circa 300000 per DUNE). Nella sezione INFN di Bologna è stato realizzato un sistema di test per validare SiPM su larga scala, sia a temperatura ambiente sia in criogenia in azoto liquido (77 K). Nella fase di commissioning di tale sistema sono stati testati i SiPM per ProtoDUNE-II: un prototipo di DUNE costruito al CERN di Ginevra.

3.2 Procedura di test di SiPM

La collaborazione di istituzioni facenti parte del DUNE Single Phase Photon Detection System Consortium ha approvato un protocollo di test di SiPM condiviso da tutti i laboratori partecipanti alla campagna di test e validazione. Tale procedura standard prevede lo studio dei parametri tensione di breakdown V_{BD} e resistenza di quenching R_q , estratti dall'analisi delle curve I-V a temperatura ambiente e in criogenia, diversi cicli termici di immersione ripetuta in azoto liquido e misure di DCR.

La procedura ha lo scopo di testare le diverse caratteristiche dei sensori in un ambiente che sarà simile a quello in cui dovranno operare in DUNE.

Lo studio delle curve I-V ha lo scopo di studiare le distribuzioni delle tensioni di breakdown V_{BD} e verificare che siano uniformi, in modo da avere un'uniforme risposta del sistema di fotorivelazione.

Grande importanza hanno i cicli termici in azoto liquido, che sottopongono il packaging dei SiPM ad un alto stress termico. L'azoto liquido ha un punto di ebollizione di -195.8°C (circa 77 K) e permette di creare una condizione simile a quella finale a cui dovranno lavorare, ovvero immersi in argon liquido ad una temperatura di circa 87 K. Tali test forniscono un confronto tra le diverse tecniche costruttive e i diversi packaging utilizzati dalle due aziende (FBK, HPK) coinvolte nella fornitura di SiPM.

La procedura completa di test definita è la seguente:

- analisi delle caratteristiche I-V e dei parametri R_q , V_{BD} a temperatura ambiente;
- analisi delle caratteristiche I-V e dei parametri R_q , V_{BD} in azoto liquido (pre cicli termici);
- emersione dall'azoto liquido seguita da due cicli ripetuti di immersione ed emersione;
- alla terza immersione una nuova analisi della caratteristica I-V e dei parametri R_q , V_{BD} in azoto liquido (post cicli termici).

3.3 Apparato di test

L'apparato per eseguire test su larga scala, realizzato nella sezione INFN di Bologna, è schematizzato in Fig. 3.3 ed è composto da diversi elementi. Il sistema è gestito da un'interfaccia LabVIEW che permette di acquisire ed analizzare curve I-V da cui ricavare i parametri resistenza di quenching R_q in polarizzazione diretta e tensione di breakdown V_{BD} in polarizzazione

inversa, di eseguire cicli termici seguendo uno specifico profilo di temperatura e di monitorare la temperatura dei SiPM e l'intero processo. Tutto l'apparato è posto all'interno di una struttura con pareti nere per garantire l'oscurazione dalla luce, necessaria per caratteristiche I-V e misure di DCR.

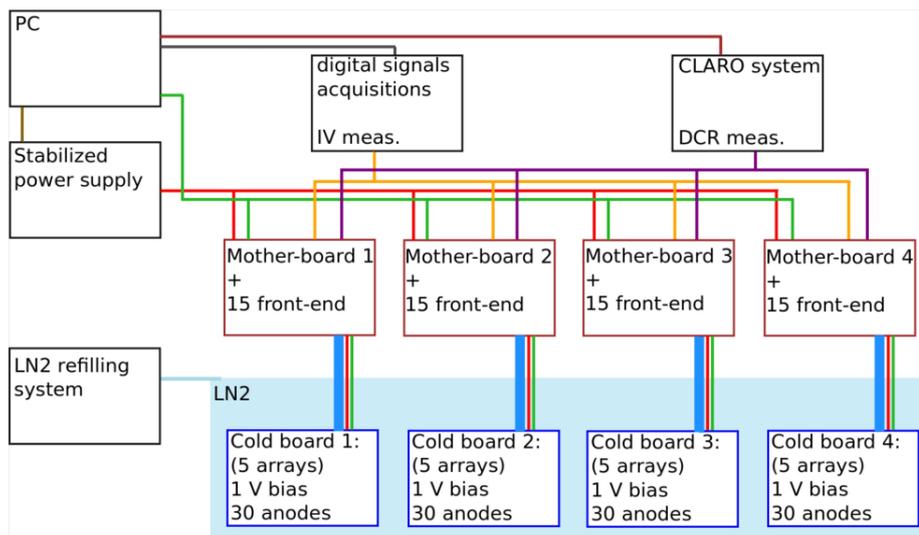


Figura 3.3: Schema del sistema di test su larga scala di SiPM. Gli array di SiPM sono alloggiati, a gruppi di 5, su delle cold board che possono essere immerse in azoto (LN2). Ogni cold board è collegata ad una motherboard che contiene l'elettronica di front-end, posta a temperatura ambiente. Il sistema può ospitare 4 cold board e 4 motherboard, per un totale di 120 SiPM. Tramite interfaccia LabVIEW l'utente può gestire da PC l'intera procedura di test.



Figura 3.4: Array di SiPM di produzione HPK. I SiPM sono alloggiati in parallelo in gruppi di 6 su uno stesso PCB, con un catodo (K) comune e 6 anodi, numerati da A1 a A6.

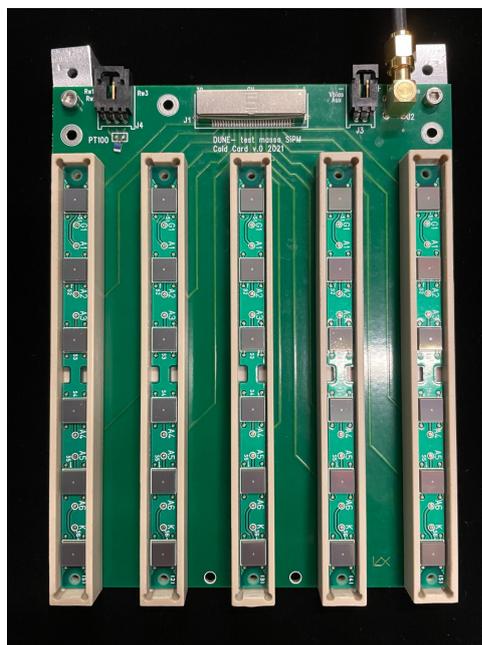


Figura 3.5: Cold board con 5 array da 6 SiPM montati. Sono visibili l'ingresso dei connettori per la tensione di bias in alto a destra e la resistenza termometrica al platino (PT100) in alto a sinistra.

Si utilizza un dewar per azoto liquido da 55 litri in cui immergere i campioni di SiPM per i test in criogenia. Tale dewar è collegato ad un contenitore con una riserva di azoto ed è dotato di un sistema di refill automatico. Il livello minimo per assicurare la completa immersione dei SiPM è così sempre monitorato e mantenuto costante.

Gli array da 6 SiPM (Fig. 3.4) sono montati in fase di test, a gruppi di 5, su delle cold board (Fig. 3.5), che possono essere immerse in azoto liquido (elettronica a freddo). Ad ogni cold board è collegata una motherboard, che contiene delle schede di front-end, che costituiscono la parte di elettronica posta a temperatura ambiente e che non viene mai immersa in azoto. Una flangia ancorata ad un attuatore motorizzato può spostarsi lungo l'asse verticale. Ad essa sono montate superiormente l'elettronica di front-end e le motherboard ed inferiormente una struttura di supporto alla quale sono agganciate le cold board. All'abbassarsi della flangia solamente i campioni vengono immersi in azoto e la flangia chiude l'apertura superiore del dewar.

Nel design del sistema di test si è scelto di ridurre il più possibile le parti da immergere in azoto, costituite da elettronica passiva, limitando così lo stress termico unicamente ai SiPM da testare.

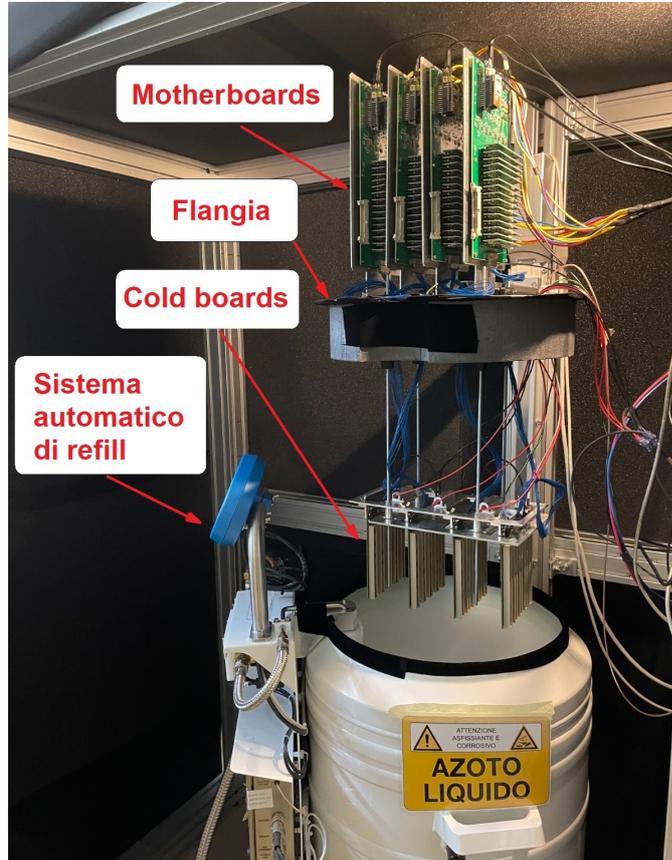


Figura 3.6: Parte del sistema di test su larga scala realizzato nei laboratori INFN, composto da 4 cold board, che alloggianno 5 array da 6 SiPM ciascuna, 4 motherboard con schede di front-end e dewar per azoto liquido con sistema di refill automatico. Cold board e motherboard sono montate su un supporto che si può muovere lungo un asse verticale per mezzo di un attuttore. Una flangia posta tra motherboard e cold board permette di chiudere l'apertura superiore del dewar quando avviene un'immersione.

La tensione di bias per la polarizzazione dei SiPM è generata da un Source Measure Unit (SMU) e portata alle cold board. Il SMU restituisce la misura della corrente che scorre nei SiPM in funzione della tensione applicata, costruendo così le curve I-V. Il sistema di test può montare 4 cold board e 4 motherboard, per un totale di 120 SiPM. L'acquisizione delle misure di I-V avviene in parallelo, caratteristica importante poiché permette di limitare le tempistiche all'aumentare del numero di campioni sotto test.

Ogni cold board è dotata di una resistenza termometrica al platino (PT-100) utilizzata per monitorare la temperatura e verificare la completa immersione dei SiPM in azoto.

Le immersioni avvengono mediante un braccio motorizzato (attuatore), a cui è collegato un supporto per cold board e motherboard. Questo sistema consente di sollevare ed abbassare i SiPM lungo un asse verticale, permettendo un'immersione controllata dei campioni sotto test seguendo un determinato profilo termico.

Tutto il sistema di test è realizzato in modo da essere il più possibile automatizzato, dall'acquisizione ed analisi delle curve I-V all'esecuzione dei cicli termici. L'utente può avviare le varie fasi della procedura di test dall'interfaccia LabVIEW da PC, che proseguono senza supervisione. Il sistema di test su larga scala così strutturato è in grado di eseguire una procedura di test completa per 120 SiPM in un giorno.

3.4 Curve corrente-tensione

Le curve I-V sono acquisite tramite il SMU (modello Keysight B2901A Series), che fornisce la tensione di bias V_{bias} ai SiPM ed acquisisce i valori di corrente, costruendo così le curve I-V. Il programma LabVIEW permette di acquisire in parallelo le curve I-V per i SiPM sia in polarizzazione diretta che inversa ed eseguire dei fit per ricavare i parametri resistenza di quenching R_q e tensione di breakdown V_{BD} .

3.4.1 Analisi in polarizzazione diretta

In polarizzazione diretta il catodo del SiPM viene posto a potenziale minore rispetto all'anodo. La caratteristica I-V presenta una regione di salita esponenziale per la corrente, seguita da una regione lineare, dominata da un comportamento resistivo. In quest'ultima regione viene eseguito un fit lineare che fornisce il valore della resistenza di quenching R_q del SiPM, uguale all'inverso del coefficiente angolare della retta di fit.

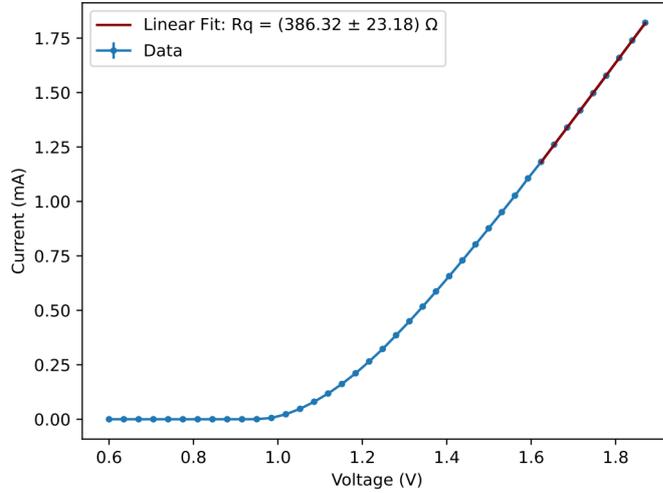


Figura 3.7: Caratteristica I-V in polarizzazione diretta in LN2 per SiPM di produzione HPK. L'inverso del coefficiente angolare della retta di fit nella regione lineare è uguale alla resistenza di quenching R_q del SiPM.

In Fig. 3.7 è riportato un esempio di caratteristica I-V per un SiPM acquisita con il SMU e in cui si è eseguito un fit lineare con il programma di analisi del sistema di test.

3.4.2 Analisi in polarizzazione inversa

In polarizzazione inversa il catodo del SiPM è posto a potenziale maggiore rispetto all'anodo. La corrente rimane limitata ad un valore basso (\sim nA) e costante finché la tensione applicata non supera il valore di breakdown V_{BD} . Oltre questa soglia la corrente inizia ad aumentare in maniera elevata per piccoli incrementi di tensione. Una tipica caratteristica I-V in polarizzazione inversa, acquisita con il sistema di test con SMU, è mostrata in blu in Fig. 3.8, con scala logaritmica in ordinata.

Il valore della tensione di breakdown V_{BD} è definito dalla procedura approvata dal consorzio di istituzioni partecipanti alla campagna di test come la tensione corrispondente al punto di flesso della caratteristica I-V. Il valore di V_{BD} è calcolato estraendo il massimo della curva $\frac{1}{I} \frac{dI}{dV}$, mostrata in verde in Fig. 3.8, in cui $\frac{dI}{dV}$ è la derivata della caratteristica I-V. La derivata $\frac{dI}{dV}$ è costruita a partire dai punti sperimentali, calcolando i rapporti incrementali $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ per coppie di punti adiacenti.

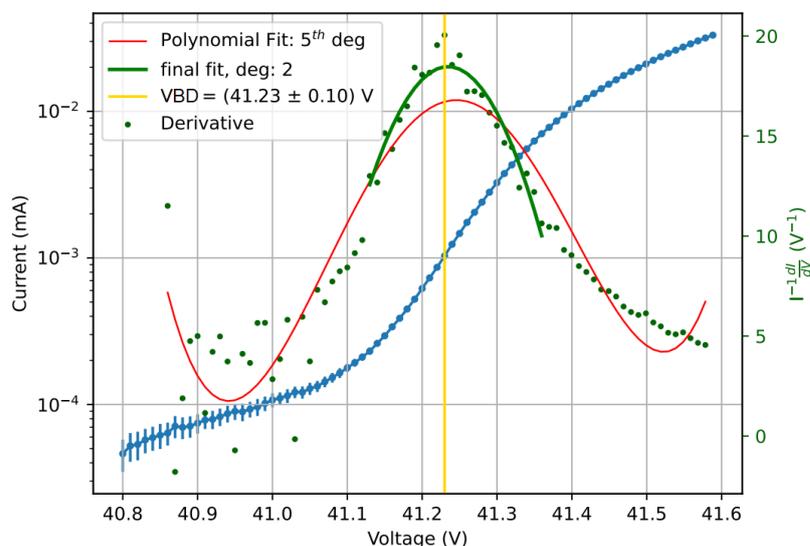


Figura 3.8: Caratteristica I-V (in blu) in polarizzazione inversa per SiPM di produzione HPK. In verde curva derivata $\frac{1}{I} \frac{dI}{dV}$ con fit quadratico e valore di V_{BD} ottenuto (in giallo).

Il punto di massimo della curva $\frac{1}{I} \frac{dI}{dV}$ è ottenuto mediante un fit quadratico. La Fig. 3.8 mostra un esempio di analisi di caratteristica I-V (in blu) e curva $\frac{1}{I} \frac{dI}{dV}$ (in verde), con fit quadratico e valore di V_{BD} ottenuto (in giallo).

3.5 Cicli termici

I cicli termici ripetuti in azoto liquido hanno lo scopo di testare la resistenza del packaging dei SiPM agli stress termici che essi subiranno quando saranno installati nel sistema di fotorivelazione di DUNE. Nella procedura di test definita i SiPM sono sottoposti a tre cicli termici, i quali seguono uno specifico profilo di temperatura, controllato dall'attuatore. Tutta la procedura è automatizzata ed è avviata dall'utente tramite l'interfaccia LabVIEW.

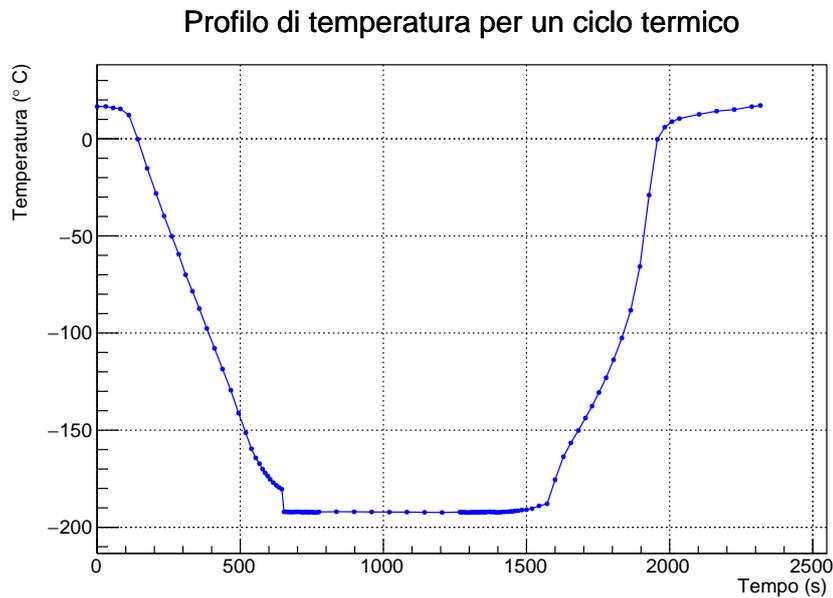


Figura 3.9: Esempio di profilo di temperatura in funzione del tempo, per un singolo ciclo termico, ottenuto da dati di laboratorio.

Il grafico in Fig. 3.9 mostra il profilo termico seguito durante un singolo ciclo. Tale profilo è composto da diverse fasi. La prima fase prevede una graduale discesa e raffreddamento in cui i SiPM vengono esposti ai vapori dell'azoto liquido, fino ad essere immersi completamente e giungere alla temperatura di circa -196°C . Nella seconda fase i SiPM rimangono immersi in azoto per circa 15 minuti. Nella terza fase, infine, i campioni vengono fatti riemergere gradualmente, fino a tornare a temperatura ambiente. Il ciclo termico in Fig. 3.9 ha una durata di circa 40 minuti.

Capitolo 4

Risultati ottenuti in laboratorio

Nel presente capitolo sono riportate le attività che ho svolto in laboratorio e i risultati delle analisi che ho condotto in collaborazione con il gruppo di ricercatori di DUNE-Bologna. Ho partecipato alla realizzazione del sistema di test su larga scala ed alla campagna di test di SiPM analizzando diverse caratteristiche I-V ed ho condotto diverse analisi statistiche su grandi campioni di SiPM, con lo scopo di studiare le proprietà principali, in particolare le distribuzioni della tensione di breakdown V_{BD} e della resistenza di quenching R_q .

I dati analizzati nel presente capitolo sono relativi a diversi campioni di array da 6 SiPM, ognuno contrassegnato da un ID identificativo, prodotti da FBK e HPK ed ottenuti dall'analisi delle curve I-V tramite i sistemi di test realizzati dalle sezioni INFN di Ferrara e Bologna. I dati a disposizione contengono valori dei parametri R_q , V_{BD} , sia a temperatura ambiente, sia in criogenia post-cicli termici. Sono stati sottoposti al test, in particolare, 2544 SiPM FBK (424 array) e 3990 SiPM HPK (665 array), entrambi destinati all'impiego in ProtoDUNE. Per alcuni dei SiPM di questi campioni sono anche disponibili dati di R_q , V_{BD} in criogenia pre-cicli termici, che è possibile confrontare con i valori post-cicli termici.

In aggiunta, ho analizzato anche i dati relativi a due campioni appartenenti ad una pre-produzione di SiPM HPK per il primo modulo del Far Detector di DUNE. Di questi, uno contenente dati per 45 array (270 SiPM) è stato misurato a Bologna, l'altro, contenente dati per 40 array (240 SiPM) a Ferrara. I SiPM di entrambi i campioni sono stati sottoposti a 20 cicli termici, invece dei 3 previsti dalla procedura di test standard.

Particolare attenzione è stata rivolta, durante le analisi statistiche, principalmente alle distribuzioni delle tensioni di breakdown in criogenia (77 K), che saranno importanti per il sistema di fotorivelazione di DUNE.

4.1 Valutazione delle prestazioni di SiPM sottoposti a cicli termici

L'obiettivo di questa analisi è di verificare se i parametri dei dispositivi sottoposti a ciclo termico subiscono variazioni oltre le specifiche richieste dall'esperimento. Ho realizzato, perciò, istogrammi per visualizzare le distribuzioni delle differenze tra resistenze di quenching R_q e tensioni di breakdown V_{BD} pre-cicli termici e post-cicli termici dei campioni di SiPM FBK e HPK destinati a ProtoDUNE ed ottenuti dalle misure effettuate con i sistemi di test di Bologna e Ferrara. Sono stati misurati 1519 SiPM FBK e 1338 SiPM HPK.

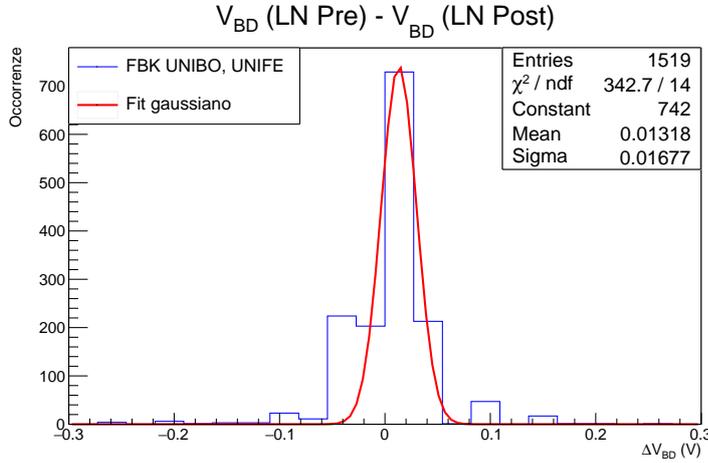


Figura 4.1: Distribuzione delle differenze tra V_{BD} pre-cicli termici e post-cicli termici per un campione di 1519 SiPM FBK per ProtoDUNE e fit gaussiano in rosso, da cui risultano media $\overline{\Delta V_{BD}} = 13.2$ mV e deviazione standard $\sigma = 16.8$ mV. Le misure sono state effettuate in parte a Bologna ed in parte a Ferrara.

4.1. PRESTAZIONI DI SIPM SOTTOPOSTI A CICLI TERMICI

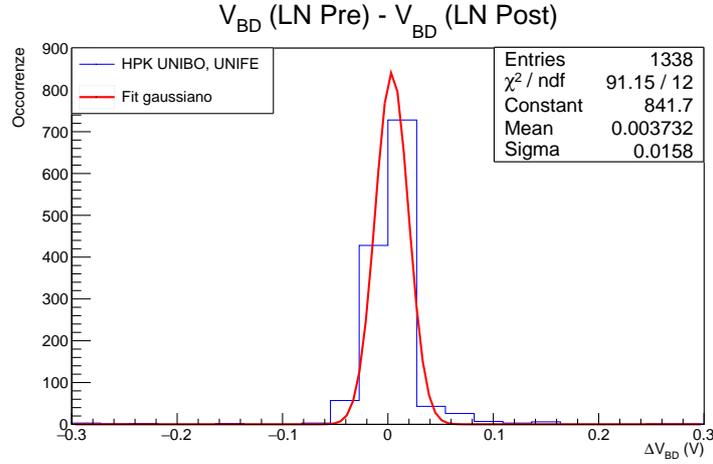


Figura 4.2: Distribuzione delle differenze tra V_{BD} pre-cicli termici e post-cicli termici per un campione di 1338 SiPM (223 array) HPK per ProtoDUNE e fit gaussiano in rosso, da cui risultano media $\overline{\Delta V_{BD}} = 3.7$ mV e deviazione standard $\sigma = 15.8$ mV. Le misure sono state effettuate in parte a Bologna ed in parte a Ferrara.

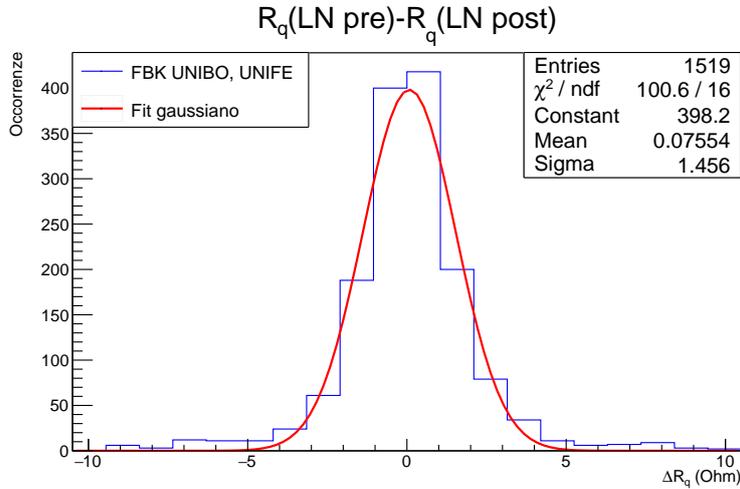


Figura 4.3: Distribuzione delle differenze tra R_q pre-cicli termici e post-cicli termici per un campione di 1519 SiPM FBK per ProtoDUNE e fit gaussiano in rosso, da cui risultano media $\overline{\Delta R_q} = 0.076$ Ohm e deviazione standard $\sigma = 1.456$ Ohm. Le misure sono state effettuate in parte a Bologna ed in parte a Ferrara.

Gli istogrammi nelle Fig. 4.1 e 4.2 mostrano le distribuzioni delle differenze ΔV_{BD} tra tensioni di breakdown in azoto liquido prima e dopo tre

cicli termici rispettivamente per campioni di SiPM FBK e HPK destinati a ProtoDUNE. I grafici sono riportati sullo stesso intervallo per un migliore confronto. Sono stati eseguiti dei fit gaussiani, da cui sono stati estratti media e deviazione standard. Per il campione di SiPM FBK risultano una media ed una deviazione standard pari a: $\overline{\Delta V_{BD}} = 13.2$ mV, $\sigma = 16.8$ mV. Per il campione HPK risultano una media $\overline{\Delta V_{BD}} = 3.7$ mV ed una deviazione standard $\sigma = 15.8$ mV.

Il grafico in Fig. 4.3 mostra la distribuzione delle differenze ΔR_q tra resistenze di quenching a freddo prima e dopo i cicli termici, per il campione di 1519 SiPM FBK di Fig. 4.1. Per tale istogramma sono stati ottenuti, mediante fit gaussiano, dei valori di media e deviazione standard rispettivamente pari a: $\overline{\Delta V_{BD}} = 0.076$ Ohm, $\sigma = 1.456$ Ohm.

Per queste distribuzioni si vuole verificare che le medie siano compatibili con 0, per confermare che globalmente i parametri R_q , V_{BD} dei SiPM non sono variati dopo l'esecuzione dei cicli termici. La compatibilità è stata valutata quantitativamente attraverso un test di ipotesi basato su un modello gaussiano.

Campione	Media	Dev. Std.	Z	p (%)
FBK V_{BD}	13.2 mV	16.8 mV	0.79	42.3
HPK V_{BD}	3.7 mV	15.8 mV	0.23	81.8
FBK R_q	0.076 Ohm	1.456 Ohm	0.05	96.0

Tabella 4.1: Test di ipotesi di compatibilità tra medie dei campioni analizzati e 0. Il test è eseguito definendo la variabile gaussiana normalizzata $z = (x - \mu)/\sigma$ e calcolando la probabilità $p(|z| > Z)$, in cui $Z = \mu/\sigma$, mediante valori tabulati [19].

In Tab. 4.1 sono riportati gli esiti del test di ipotesi della compatibilità con 0 delle medie dei campioni. La variabile z definita è una variabile gaussiana normalizzata, utilizzata per calcolare le probabilità mediante opportune tavole. Le probabilità calcolate, essendo superiori al valore convenzionale del 5 %, non hanno evidenziato discrepanze con l'ipotesi di compatibilità assunta, confermando che globalmente i parametri R_q , V_{BD} non sono variati a seguito dei cicli termici.

4.2 Uniformità delle tensioni di breakdown

Come discusso nel Cap. 3, poiché i 6 SiPM su un array saranno alimentati dalla stessa tensione di bias, è importante che essi abbiano una tensione di

4.2. UNIFORMITÀ DELLE TENSIONI DI BREAKDOWN

breakdown il più uniforme possibile, in modo da minimizzare le variazioni di risposta del sistema di fotorivelazione. Perciò ho analizzato i dati dei due campioni di SiPM HPK di una pre-produzione per il primo modulo del Far Detector di DUNE con lo scopo di studiare le differenze tra le sei tensioni di breakdown all'interno dei singoli array. Per ogni array sono state individuate la tensione di breakdown massima e la minima (in criogenia, post-cicli termici) e sono stati realizzati istogrammi delle differenze tra le due. Per essere idonei all'impiego nel Far Detector di DUNE è richiesto che i singoli array abbiano differenze tra tensione di breakdown massima e minima non superiore a 200 mV.

Come precedentemente detto, i campioni della pre-produzione di SiPM HPK per il primo modulo del Far Detector di DUNE a disposizione sono due: uno, ottenuto a Bologna, contenente dati per 45 array, l'altro, ottenuto a Ferrara, contenente dati per 40 array. I SiPM di questi due campioni hanno eseguito 20 cicli termici. Nell'analisi i due campioni sono stati uniti in un unico campione da 85 array.

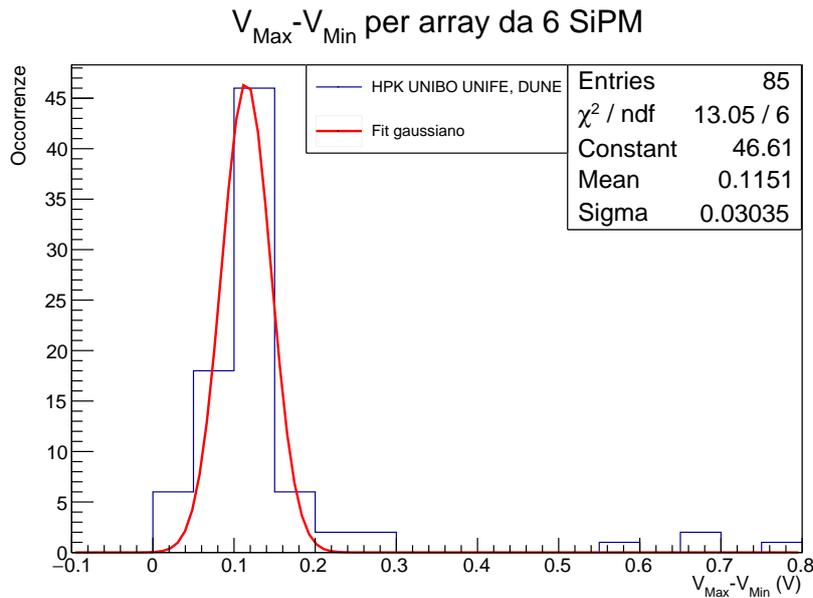


Figura 4.4: Istogramma delle differenze tra tensioni di breakdown massima e minima, a freddo post-cicli termici, per il campione di 85 array HPK (dati di Bologna e Ferrara): l'array con ID 54 non è mostrato poiché costituisce un outlier con valore $\Delta V_{BD} = 3 \text{ V}$. Fit gaussiano in rosso, da cui risultano media e deviazione standard: $\overline{\Delta V}_{BD} = 115.1 \text{ mV}$, $\sigma = 30.4 \text{ mV}$.

Il grafico in Fig. 4.4 è un istogramma delle differenze tra tensioni di

breakdown massima e minima, a freddo post-cicli termici, per 84 degli 85 array dei due campioni di Bologna e Ferrara. Un array (ID 54) è stato escluso dall'analisi poiché outlier, con $V_{Max} - V_{Min} = 3$ V, probabilmente dovuto ad un errore nella misura. Tra gli 84 array considerati si è osservata una distribuzione di core con 80 array, mentre altri 4 array, per i quali c'è probabilmente stato un errore nella misura di V_{BD} , hanno valori delle differenze $V_{Max} - V_{Min}$ compresi tra 0.6 V e 0.8 V, che costituiscono degli outlier.

Si è eseguito un fit gaussiano sul core della distribuzione, che ha restituito media e deviazione standard pari a: $\overline{\Delta V_{BD}} = 115.1$ mV, $\sigma = 30.4$ mV. Il fit gaussiano è stato eseguito anche senza considerare i 4 outlier, dando dei valori di media e deviazione standard invariati.

Sono stati rilevati, in particolare, 9 array aventi differenza tra tensioni di breakdown massima e minima superiore a 200 mV, quindi non conformi ai requisiti di DUNE, di cui 5 probabilmente dovuti ad errori di misura. La percentuale di array idonei è risultata quindi dell'89.4% e del 95% se non si considerano gli array con probabile errore di misura.

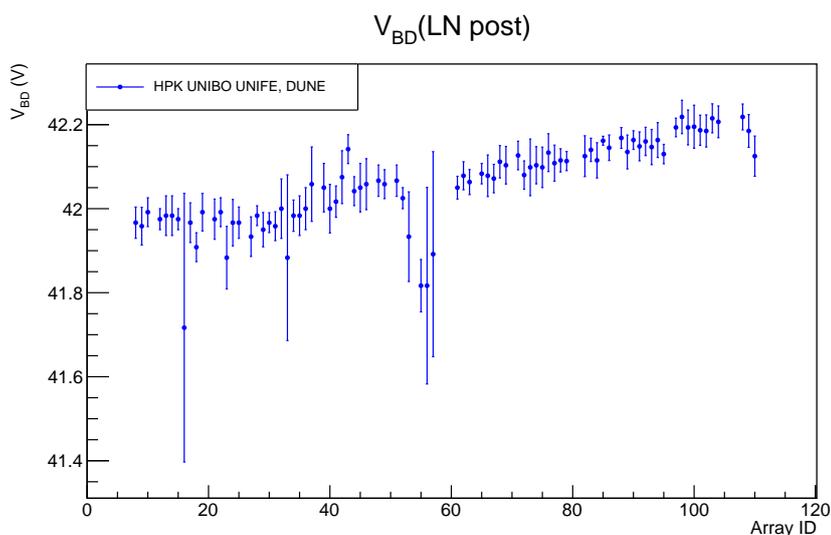


Figura 4.5: Tensioni di breakdown medie in funzione degli ID identificativi per il campione di 85 array HPK per DUNE (dati di Bologna e Ferrara). Le barre d'errore rappresentano le deviazioni standard delle tensioni di breakdown dei 6 SiPM per ogni array. Sono rappresentati solo 84 array: l'ID 54 è stato escluso.

Per questo campione di 85 array sono stati anche realizzati dei grafici che mostrano le tensioni di breakdown medie in funzione degli ID iden-

4.2. UNIFORMITÀ DELLE TENSIONI DI BREAKDOWN

tificativi degli array. Il grafico in Fig. 4.5 mostra in ordinata le tensioni di breakdown medie, a freddo post-cicli termici, dei 6 SiPM su ogni array e in ascissa i rispettivi ID identificativi. Le barre d'errore rappresentano le deviazioni standard delle tensioni di breakdown dei 6 SiPM e danno un'indicazione di quanto tali tensioni siano uniformi sui singoli array. Si nota che per la maggior parte degli ID le barre d'errore sono inferiori a 100 mV, mentre per 4 ID ci sono barre molto più estese e superiori a 200 mV. Questi 4 array sono outlier della distribuzione in Fig. 4.4, di cui si può individuare l'ID identificativo per procedere ad un'eventuale rimisura.

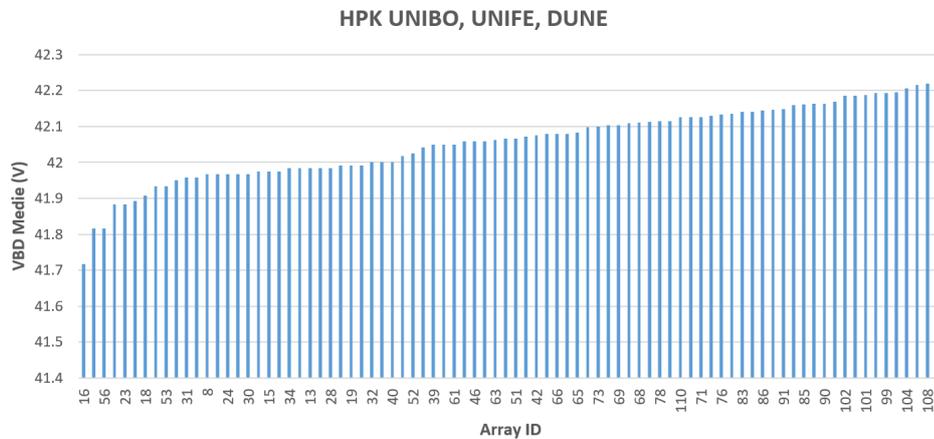


Figura 4.6: Tensioni di breakdown medie ed ID per il campione di 85 array HPK per DUNE. I valori delle tensioni sono disposti in ordine crescente. L'array con ID 54 non è mostrato.

Il grafico in Fig. 4.6 mostra in ordinata le tensioni di breakdown medie dei singoli array, disposte in ordine crescente e in ascissa gli ID. Tale grafico permette di ordinare gli ID in modo da poter scegliere opportunamente gruppi di array con tensioni di breakdown medie il più possibile uniformi. Questo sarà un aspetto importante durante la realizzazione delle matrici di fotorivelazione di DUNE, per le quali si vuole una risposta uniforme e array di SiPM con tensioni di breakdown più vicine possibili.

Conclusioni

L'esperimento DUNE avrà come obiettivo principale quello di studiare il fenomeno dell'oscillazione dei neutrini e cercare risposte a diversi quesiti aperti su queste particelle. Il Far Detector di DUNE, attualmente in fase di costruzione in America, sarà equipaggiato con un sistema di fotorivelazione che utilizzerà fotomoltiplicatori al silicio (SiPM): sensori allo stato solido basati sui fotodiodi. Tali sensori dovranno operare in condizioni criogeniche immersi in argon liquido (87 K) e dovranno soddisfare specifici requisiti relativi alla qualità del packaging ed alle sorgenti di rumore. A causa di ciò e del gran numero di SiPM che saranno richiesti per DUNE, è in atto un'intensiva campagna di test volta alla validazione di tali sensori.

Il lavoro di tesi qui presentato si inserisce nell'ambito di questa campagna ed ha avuto come principale scopo quello di analizzare statisticamente grandi campioni di SiPM. L'attività di laboratorio svolta, nella sezione INFN di Bologna, ha previsto la realizzazione di un sistema di test di SiPM su larga scala, replicato anche a Ferrara, in grado di eseguire cicli termici ripetuti in azoto liquido (77 K) e di portare a termine la caratterizzazione di 120 SiPM in parallelo.

Con i dati per tensioni di breakdown V_{BD} e resistenze di quenching R_q , ottenuti da Bologna e Ferrara, ho svolto diverse analisi statistiche su un grande numero di campioni di SiPM, destinati all'impiego in ProtoDUNE e DUNE. In particolare, ho potuto confrontare i valori prima e dopo l'esecuzione dei cicli termici previsti dal protocollo di test standard, verificando che restassero invariati mediante dei test di ipotesi. Ho potuto studiare le distribuzioni delle tensioni di breakdown a livello di singoli array da 6 SiPM, verificare che soddisfacessero i requisiti per DUNE ed individuare i dispositivi non conformi ai requisiti.

I risultati delle analisi su un primo campione di circa 3000 SiPM hanno mostrato che globalmente le prestazioni dei sensori non subiscono varia-

zioni significative dopo aver effettuato i cicli termici richiesti. Inoltre, le analisi sui campioni di SiPM HPK della pre-produzione per il primo modulo del Far Detector di DUNE hanno evidenziato che tali campioni sono conformi alle richieste di uniformità delle tensioni di breakdown sui singoli array e sono stati rilevati, su 85 array, 9 non idonei, con una percentuale dell'89.4 % di dispositivi idonei. Non considerando i 5 array per cui ci sia probabile errore di misura, è risultata una percentuale di idoneità del 95%.

Bibliografia

- [1] Spurio M. Braibant S., Giacomelli G. *"Particelle e interazioni fondamentali"*. Springer-Verlag, 2012.
- [2] Aker M. et al. "Improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN". *Physical Review Letters*, 123(22), nov 2019, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.221802>.
- [3] Resnick R. Eisberg R. *"Quantum Physics Of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei And Particles"*. John Wiley and Sons, 1974.
- [4] Kenneth S. Krane. *"Introductory Nuclear Physics"*. Oregon State University.
- [5] Hans-G Hildebrandt. "Theory and reality on the experiment of Reines/Cowan 1956". 2015.
- [6] Darrel Smith. "Calculating the Probability for Neutrino Oscillations". *Student Lecture Series for MiniBooNE*. Embry-Riddle University.
- [7] Barros N. "The Goals and Status of the DUNE Experiment". feb 2021.
- [8] Acciarri R. et al. "Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Conceptual Design Report Volume 1: The LBNF and DUNE Projects". 2016, <https://arxiv.org/abs/1601.05471>.
- [9] Ainsworth R. et al. "An Upgrade Path for the Fermilab Accelerator Complex". 2021, <https://arxiv.org/abs/2106.02133>.

BIBLIOGRAFIA

- [10] Abud A. et al. "Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Near Detector Conceptual Design Report", 2021, <https://arxiv.org/abs/2103.13910>.
- [11] Constance W. "DUNE building prototype cryostats". 2016. Sanford Underground Research Facility.
- [12] Abi B. et al. "Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE), Far Detector Technical Design Report, Volume IV: Far Detector Single-phase Technology". 2020, <https://arxiv.org/abs/2002.03010>.
- [13] Falcone A. et al. "Cryogenic SiPM arrays for the DUNE photon detection system". 2020.
- [14] Heering A. Gundacker S. "The silicon photomultiplier: fundamentals and applications of a modern solid-state photon detector". *Physics in Medicine, Biology*, 65, 2020, <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab7b2d>.
- [15] Halkias Christos C. Millman J. "*Electronic Devices and Circuits*". McGraw Hill Text, 1967.
- [16] P. Buzhan et al. "silicon photomultiplier and its possible applications". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 504, 2003, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203007496>.
- [17] Anfimov N. et al. "Study of silicon photomultiplier performance at different temperatures". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 997, 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900221001467>.
- [18] Impiombato D. et al. "Evaluation of the optical cross talk level in the SiPMs adopted in ASTRI SST-2m cherenkov camera using EASIROC front-end electronics". *Journal of Instrumentation*, feb 2014, <https://doi.org/10.1088%2F1748-0221%2F9%2F02%2Fc02015>.
- [19] Fornasini P. "*The Uncertainty in Physical Measurements: An Introduction to Data Analysis in the Physics Laboratory*". Springer, 2008.

Ringraziamenti

Al termine della stesura di questo lavoro di tesi vorrei spendere qualche parola per ringraziare tutti coloro che ne hanno permesso la realizzazione e che hanno reso indimenticabili questi tre anni.

Innanzitutto ringrazio il mio relatore Gabriele Sirri, per avermi seguito con pazienza durante la scrittura e per avermi insegnato il rigore scientifico, necessario per produrre lavori di qualità. Grazie ai miei correlatori Alessandro Montanari, sempre pronto a darmi consigli e coinvolgermi, Elisabetta Montagna e a tutto il gruppo di DUNE, persone meravigliose che mi hanno subito accolto a braccia aperte. Grazie a loro ho potuto finalmente entrare a far parte di una squadra, sentirmi protagonista e capire cosa significhi gestire un laboratorio, esperienza che sin dai tempi del Liceo sognavo e non poteva realizzarsi in modo migliore.

Un grazie speciale lo vorrei rivolgere ad Elisabetta, che è sempre stata disponibilissima in ogni momento in questi mesi a soddisfare ogni mia singola curiosità, dubbio o qualsiasi cosa mi passasse in mente e mi ha sempre coinvolto in questa meravigliosa esperienza di laboratorio, che spero sarà la prima di tante, mostrandomi tutti gli aspetti di un *mestiere* bellissimo.

Un enorme grazie di cuore va alla mia mamma ed al mio babbo per tutto il sostegno ed i valori che mi hanno sempre trasmesso, l'interesse verso la meravigliosa materia che ho studiato e per avermi permesso di arrivare fin qui. Grazie anche a tutti i miei familiari e a mia zia, che mi ha sempre supportato ed incoraggiato di fronte ad ogni esame.

Grazie a tutti gli amici che ho conosciuto in questi anni e con cui ho condiviso tanto: Simo (miglior compagno di laboratorio, studio e vita, che mi ha sempre aiutato), Nico, Gabriel, Massi e tanti altri.

Infine grazie a tutti coloro che mi hanno silenziosamente ed inconsapevolmente supportato in tutti questi anni, le mie prof. di Liceo ed i miei amici di una vita: Giovanni, Lucian, Ilenia, Alex, Roberta, Miche, Leo.